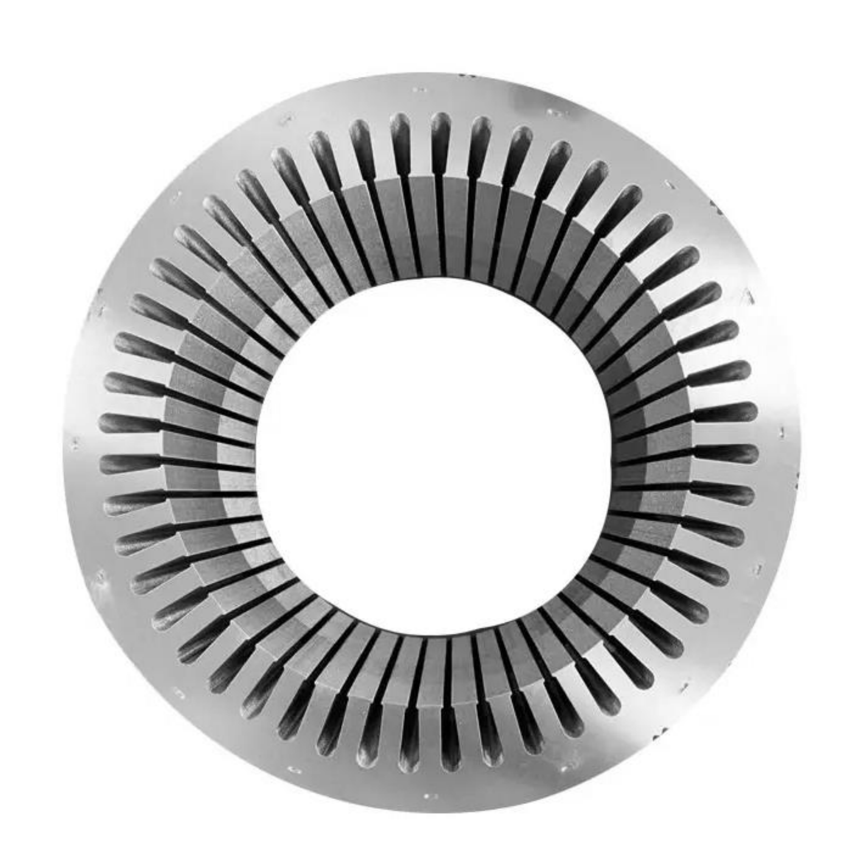
Маршак Е. Л.

РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ

Библиотечка сельского электрика



"Колос" Москва, 1974 г.

Rev. 02 04 July 2023

Общие сведения.

Поступающий в ремонт электродвигатель снабжен, как правило, заводским паспортным щитком (паспортная табличка). По обмотке и сведениям, указанным на щитке, не составляет труда определить паспортные и обмоточные данные электродвигателя.
Для электродвигателей самых разнообразных серий и типов, как выпускаемых в настоящее время, так и снятых с производства, конструктивные и обмоточные данные опубликованы в специальных альбомах.
Если сохранился заводской паспорт и обмотка электродвигателя, есть данные по обмотке в соответствующем альбоме и если у отремонтированного двигателя требуется сохранить заводские параметры – частоту (скорость) вращения и напряжение, то нет надобности проводить перерасчет двигателя. Достаточно убедиться в идентичности фактического исполнения обмотки и обмоточных данных приведенных в альбоме, и полностью повторить заводское исполнение.
Если же нет никаких сведений, следует с максимальной тщательностью измерить активные части электродвигателя (внешний и внутренний диаметры, длину сердечников статора и ротора), пересчитать число пазов статора и ротора и попытаться найти в альбоме тип электродвигателя, соответствующие данные которого полностью совпали бы с замеренными. Если таким способом будет точно установлен тип электродвигателя, также нет надобности проводить расчет обмотки, ее следует выполнить по данным соответствующим выявленному типу.
Если нет паспортного щитка и обмотки необходимость расчета очевидна. Но даже и в том случае, когда сохранился заводской щиток электродвигателя и обмотка находится в таком состоянии, что можно определить обмоточные данные, требуется рассчитать обмотку. Это объясняется тем, что электродвигатель мог ремонтироваться ранее с отступлениями от заводского исполнения, причем эти отступления могли быть недопустимыми и предположительно могли послужить причиной выхода электродвигателя из строя. Расчетным путем следует установить, соответствует ли обмотка электродвигателя его паспортным данным, в норме ли находятся его электромагнитные нагрузки.
Расчеты обмоток также необходимы для ремонта связанного с изменением частоты вращения и напряжения. Задача заключается в определении новых обмоточных данных и новой мощности электродвигателя когда нет требуемого провода или электроизоляционных материалов, или когда не представляется возможным заложить в пазы необходимое число проводов. Тогда расчетным путем определяется возможность изменения обмоточных данных электродвигателя и влияние этого изменения на его параметры.
Расчет обязателен также и при замене медного провода обмотки на алюминиевый. Здесь надо выбрать оптимальные обмоточные данные, такие при которых мощность электродвигателя сохраняется или снижается в минимальной степени.
Таким образом, при ремонте электродвигателя, в зависимости от его состояния и характера ремонта должен производиться один из следующих видов расчета.
Поверочный расчет электродвигателей не охваченных альбомом обмоточных данных, как при сохранившейся, так и при отсутствующей обмотке – для проверки соответствия фактических обмоточных данных заводским и для сопоставления электромагнитных нагрузок ремонтируемого электродвигателя с допустимыми нагрузками.
Расчет при изменении параметров электродвигателя – для определения обмоточных данных, обеспечивающих новые измененные параметры.
Расчет при изменении заполнения паза – для оценки влияния изменения обмоточных и конструктивных данных (размеров провода, числа витков заложенных в паз, вида пазовой изоляции и др.) на мощность электродвигателя.
Расчет при изменении материала провода (замена медного провода на алюминиевый) – для оценки влияния этой замены на мощность электродвигателя.

Расчет для определения (восстановления) параметров электродвигателя – для электродвигателей не охваченных альбомом обмоточных данных, при отсутствии заводского паспортного щитка и демонтированной обмотки. Последний вид расчета, являющийся наиболее сложным, может дать только приближенное решение, которое должно быть уточнено по результатам испытания отремонтированного электродвигателя.

Как указывалось выше, основным критерием для расчета электродвигателя у которого отсутствуют заводской паспортный щиток и обмотка, являются снятые с натуры размеры стальных сердечников, поэтому все измерения следует проводить с максимальной тщательностью, повторяя каждое измерение 2 – 3 раза и пользуясь абсолютно исправными измерительными инструментами.

Предварительно перед измерением электродвигатель необходимо очистить от грязи, краски и лака. Особо важно очистить пазы от остатков старой изоляции.

Длину сердечника (статора или ротора) следует измерять не по наружной поверхности, а по пазовой части, закладывая измерительную линейку на дно паза. Измерение длины сердечника по зубцам может дать неправильные результаты, так как во многих случаях на торцах сердечника зубцы расходятся – отгибаются в аксиальном направлении.

Наружный диаметр сердечника статора или внутренний диаметр сердечника ротора не всегда доступен для непосредственного измерения. В этих случаях приходится прибегать к косвенным способам, например замерив внутренний диаметр сердечника статора D_1, высоту зубца h_{13}, высоту спинки $h_{1С}$, определяют наружный диаметр сердечника статора $D_{1Н}$ из соотношения:

$$D_{1\text{Н}} = D_1 + 2 \times h_{13} + 2 \times h_{1\text{С}}$$

Пазы закрытой и полузакрытой формы рекомендуется измерять снимая оттиски на пластинки свинца или электрокартона, а открытые пазы – непосредственно штангенциркулем, линейкой, калибром и др. Наиболее распространенные формы пазов, а также расчетные формулы для определения их площади приведены на рисунке 1. Толщину стальных листов следует определять замерив расстояние между двумя радиальными вентиляционными каналами (а при отсутствии каналов – длину всего сердечника стали) l и подсчитав количество листов стали на указанном участке $n_{Л}$.

Толщина листа:

$$l_{\text{Л}} = \frac{k \times l}{n_{\text{Л}}}$$

где k – коэффициент зависящий от вида межлистовой изоляции и составляющий: 0,87–0,90 – при бумажной изоляции (встречается у электродвигателей очень старых выпусков); 0,91–0,93 – при лаковой изоляции; 0,93–0,95 – при оксидной изоляции или при отсутствии изоляции. Сердечники статора обычно набирают из листов толщиной 0,5 *мм*. и реже из листов толщиной 0,35 *мм*. Таким образом определить толщину листа можно совершенно безошибочно.

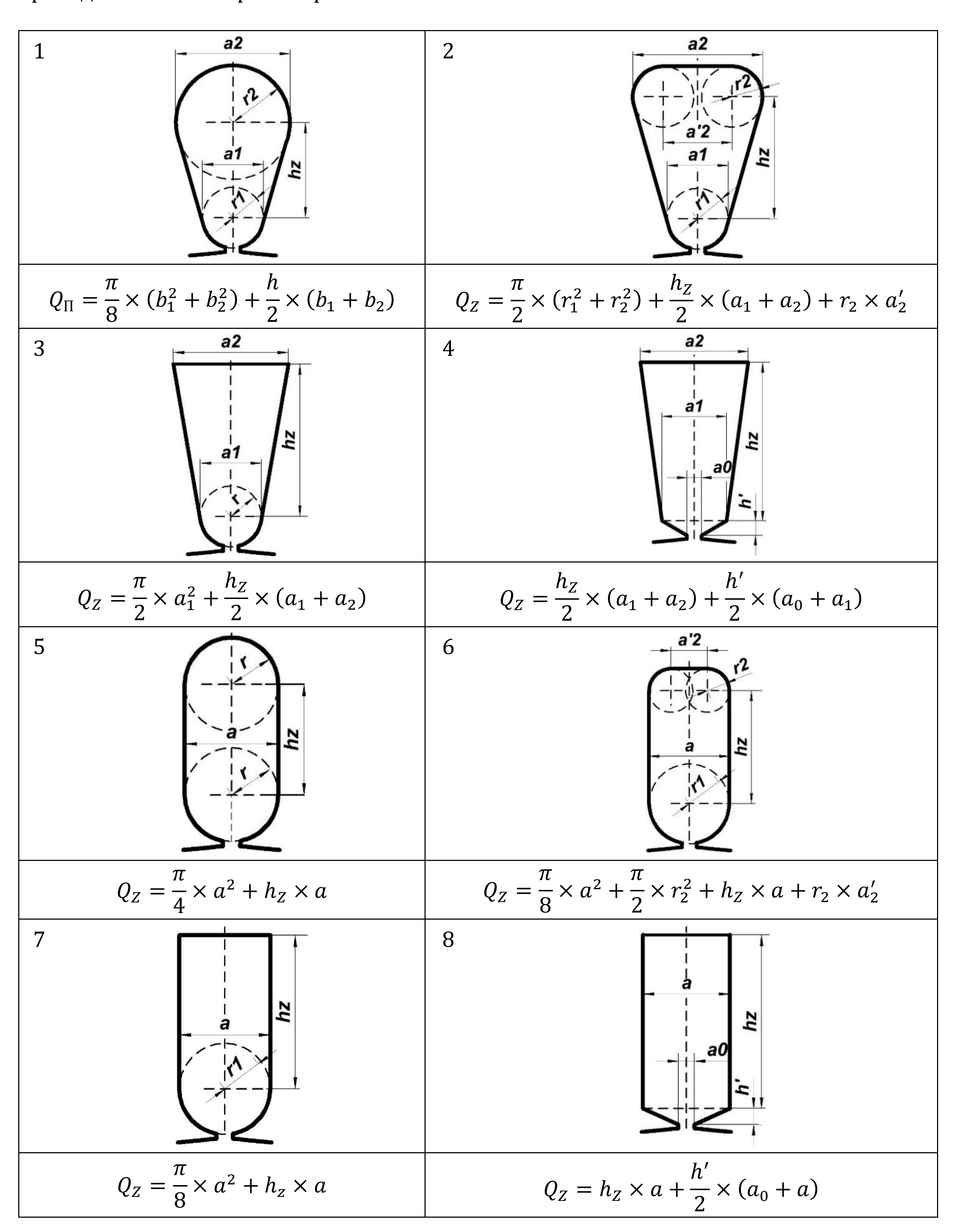
Воздушный зазор следует измерять с двух противоположных торцов электродвигателя при помощи калиброванного щупа, вводимого через специальные или смотровые люки в торцевых щитах. С каждой стороны измерение нужно проводить в четырех точках, смещенных одна относительно другой на 90°, величина зазора принимается как среднее арифметическое всех замеров. У некоторых электродвигателей люков в щитах нет. В таких случаях зазор можно измерить только после разборки.

Для этого ротор укладывают непосредственно в статор и замеряют зазор δ_1 против самой верхней части расточки статора. Вслед за тем ротор поворачивают на 90° и вновь замеряют зазор против той же точки статора δ_2.

Величина зазора:

$$\delta\text{ср} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{4}$$

Для проверки правильности измерения можно руководствоваться таблицей 1. Данные приведенные в ней ориентировочные.



1	2
$Q_П = \frac{\pi}{8} \times (b_1^2 + b_2^2) + \frac{h}{2} \times (b_1 + b_2)$	$Q_Z = \frac{\pi}{2} \times (r_1^2 + r_2^2) + \frac{h_Z}{2} \times (a_1 + a_2) + r_2 \times a_2'$
3	4
$Q_Z = \frac{\pi}{2} \times a_1^2 + \frac{h_Z}{2} \times (a_1 + a_2)$	$Q_Z = \frac{h_Z}{2} \times (a_1 + a_2) + \frac{h'}{2} \times (a_0 + a_1)$
5	6
$Q_Z = \frac{\pi}{4} \times a^2 + h_Z \times a$	$Q_Z = \frac{\pi}{8} \times a^2 + \frac{\pi}{2} \times r_2^2 + h_Z \times a + r_2 \times a_2'$
7	8
$Q_Z = \frac{\pi}{8} \times a^2 + h_z \times a$	$Q_Z = h_Z \times a + \frac{h'}{2} \times (a_0 + a)$

Рис. 1. Наиболее распространенные формы пазов и формулы подсчета площади.

Таблица 1. Приближенные размеры воздушного зазора, *мм*.

об. мин.	зазор *мм.*, при мощности электродвигателя *квт.*									
	до 0,2	0,3 – 1	1 – 1,25	2,5 – 3	5 – 10,0	10 – 20	20 – 50	50 – 100	100 – 200	200 – 300
500 – 1500	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,65	0,8	1,0
3000	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,55	0,8	1,0	1,25	1,5

Следует отметить, что в отличие от расчетов электрических машин проводимых на машиностроительных заводах, когда при расчете определяют размеры сердечников активной стали статора и ротора и выбирают число пазов, при ремонте задача значительно упрощается, расчет выполняется применительно к существующим сердечникам и сводится к выбору типа обмотки, определению числа витков в пазу и сечения провода, при которых достигается оптимальное соотношение нагрузок: магнитных – в активной стали и электрических – в обмотке.

Основными электродвигателями эксплуатируемыми в сельском хозяйстве являются односкоростные асинхронные электродвигатели трехфазного тока с короткозамкнутым ротором единой серии А2, АО2 и АОЛ2 мощностью от 0,6 до 100 *квт*. Электродвигатели серии выпускаются в брызгозащищенном исполнении (тип А2) и закрытом обдуваемом исполнении (тип АО2). В указанном диапазоне мощности серия состоит из девяти габаритов (1 – 9–й), отличающихся диаметром сердечника статора. Каждый габарит имеет две длины сердечника статора и таким образом серия имеет восемнадцать типоразмеров. Шкала мощностей состоит из ступеней: 0,6 – 0,8 – 1,1 –1,5 – 2,2 – 3,0 – 4,0 – 5,5 – 7,5 – 10 – 13 – 17 – 22 – 30 – 40 – 55 – 75 и 100 *квт*. Шкала мощности твердая, мощности электродвигателей на различные частоты вращения (3000, 1500, 1000 и 750 *об. мин.*) одни и те же и соответствуют приведенному выше ряду.

Типы электродвигателей входящих в серию имеют буквенно–цифровое обозначение, например АО2–64–4, которое расшифровывается следующим образом: А – асинхронный, О – обдуваемый, первая цифра после букв – номер серии, вторая цифра – порядковый номер габарита, третья цифра – порядковый номер длины сердечника, четвертая цифра – число полюсов. Электродвигатели А2 и АО2 изготовляются с чугунной станиной. Электродвигатели 1, 2 и 3 габаритов выполняются, кроме того, со станиной из алюминиевого сплава (обозначение АОЛ2). Обмоточные данные электродвигателей единой серии А2, АО2 и АОЛ2, а также их специализированных исполнений приведены в справочнике Цибулевского И. П. "Обмоточные данные асинхронных двигателей", 1971.

Схемы обмоток.

Общие сведения.

В настоящем разделе схемам обмоток уделено внимание лишь в той степени, в какой они влияют на расчет обмотки.

Исходным элементом обмотки является катушка, состоящая из одного или нескольких последовательно соединенных витков. Витком называется элемент из двух последовательно соединенных между собой проводников, расположенных под соседними разноименными полюсами. Проводники образующие виток могут быть подразделены на несколько параллельных проводов. К разделению витка прибегают для удобства намотки во избежание применения грубого провода большого сечения.

Части катушки, лежащие в пазах активной стали, называются пазовыми или активными частями катушки, так как они непосредственно участвуют в создании *эдс*.

Проводники лежащие вне пазовой части и служащие для соединения между собой активных частей катушки называются лобовыми частями катушки.

Катушка характеризуется также шагом, т, е. числом пазовых делений, заключенных между центрами пазов, в которые закладывают стороны катушки.

Шаг катушки $y_{\text{П}}$ называют диаметральным если он равен полюсному делению. В этом случае, например для статора:

$$y\text{п}_1 = \tau_1 = \frac{Z_1}{2p}$$

где: Z_1 – число пазов статора, $2p$ – число полюсов обмотки.
Полюсное деление представляет длину части окружности расточки статора приходящейся на долю одного полюса, *см.*:

$$\tau_1 = \frac{\pi \times D_1}{2p}$$

где D_1 – диаметр расточки статора, *см*. В двухполюсной электрической машине центральный угол, соответствующий полюсному делению, составляет 180°, в четырехполюсной – 90°, в шестиполюсной – 60° и т. д. При составлении схем обмоток принято при любом числе полюсов электродвигателя считать угол, соответствующий полюсному делению, равным 180 *электрических градусов*. Тогда число электрических градусов в окружности расточки электрической машины с любым числом полюсов будет равно $180 \times 2p$.
Шаг катушки может быть несколько меньше диаметрального, в этом случае его называют укороченным. Укорочение шага катушки (обмотки) характеризуется коэффициентом укорочения:

$$\beta_1 = \frac{y_{1\text{П}}}{\tau_1}$$

где $y_{\text{П}1}$ – укороченный шаг обмотки статора.
Несмотря на то, что укорочение шага влечет за собой уменьшение *эдс* в катушке (обе стороны витка при укороченном шаге не могут одновременно находиться под центрами соседних полюсов), оно широко применяется в двухслойных обмотках электрических машин переменного тока, так как не только экономится медь на длине лобовых частей, но и улучшаются электрические свойства электродвигателя, облегчается укладка катушек в пазы.
В обмотках различных типов, исходя из условий электромагнитного расчета и технологических соображений, применяют укорочение шага β обычно 0,85 – 0,75, реже до 0,66 (в отдельных случаях и до 0,5).
Характерным показателем обмотки электродвигателя является q – число пазов на полюс и фазу. Это число показывает сколько катушечных сторон каждой фазы приходится на один полюс обмотки. Поскольку катушечные стороны одной фазы, лежащие под двумя соседними полюсами обмотки, образуют катушечную группу, число q показывает из скольких катушек состоят катушечные группы данной обмотки.
К обозначениям относящимся к статору прибавляется индекс 1 (например, число пазов статора обозначается Z_1). К обозначениям, относящимся к ротору прибавляется индекс 2 (например, число пазов ротора обозначается Z_2).
Таким образом, для статора где m – число фаз обмотки:

$$q_1 = \frac{Z_1}{2p \times m}$$

Для рассматриваемых нами трехфазных обмоток:

$$q_1 = \frac{Z_1}{6 \times p}$$

Если, к примеру $Z_1 = 60$, $2p = 4$:

$$q_1 = \frac{Z_1}{6 \times p} = \frac{60}{6 \times 2} = 5$$

Если же статор этой машины использовать для изготовления восьмиполюсной машины, то:

$$q_1 = \frac{60}{6 \times 4} = 2{,}5$$

т. е, число пазов на полюс и фазу будет дробным.

Дробное q_1, так же как и целое, определяет количество катушек в каждой катушечной группе. Так как число катушек в катушечной группе может быть только целым числом, то дробное может быть реализовано только как среднее значение, т. е. половина катушечных групп должна состоять из двух и половина – из трех катушек.

Из условий симметрии обмотки следует, что во всех трех ее фазах должно быть одинаковое число катушек симметрично расположенных по окружности стального сердечника. Именно в этом случае суммарные *эдс* фаз обмотки будут равны по величине и сдвинуты одна относительно другой на 120 или 240°.

Катушки должны быть соединены в катушечные группы, а последние – в фазы так, чтобы соблюсти необходимое количество полюсов обмотки и правильное их чередование.

Катушки внутри катушечной группы соединяют всегда последовательно, а катушечные группы в фазе могут быть соединены последовательно, параллельно или смешанным способом (последовательно–параллельно). Основным правилом при пересоединении последовательной обмотки в параллельную или смешанную является сохранение направления тока в катушечных группах таким же, каким оно было бы при последовательном соединении, в котором направленно токов определяется чередованием полюсности обмотки.

На схеме требуется указать способ соединения фаз обмотки – в звезду или в треугольник. Каким из этих способов должны быть соединены фазы определяют расчетом обмотки.

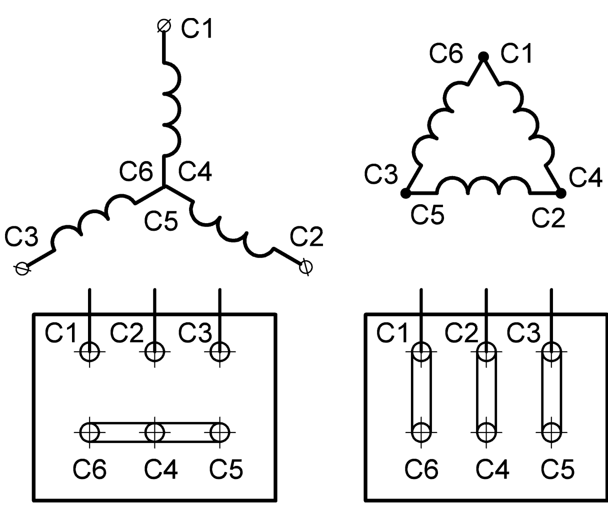


Рис. 2. Соединение фаз обмотки электродвигателя напряжением 220/380 *в* звездой 380 *в*, треугольником 220 *в*.

Для одного и того же номинального напряжения для различных машин можно применять и тот, и другой способы. Само соединение фаз может быть выполнено как внутри двигателя, глухо, так и при помощи перемычек в коробке соединений вынесенной на корпус. Последний способ удобен тем, что позволяет более четко проводить профилактические испытания обмотки в процессе эксплуатации, так как начала и концы всех фаз могут быть свободно присоединены к испытательной аппаратуре.

Очень часто электродвигатели бывают пригодны для работы на любом из двух номинальных напряжений, находящихся в соотношении 1 : 1,73, например 127 и 220 *в*, 220 и 380 *в* или 380 и 660 *в*, тогда при меньшем из этих двух напряжений его фазы должны быть соединены в треугольник, а при большем – в звезду.

На рисунке 2 показаны принципиальные схемы соединения фаз обмотки и соответствующие этим соединениям переключения, производимые на внешнем щитке для асинхронного двигателя на номинальные напряжения 220/380 *в*.

Обмотки электродвигателей подразделяются на петлевые и волновые. Петлевые, как правило, используют для статоров, волновые – для фазовых роторов асинхронных двигателей.

Как петлевые, так и волновые обмотки могут быть *однослойными* и *двухслойными*. При однослойной обмотке каждая сторона катушки занимает весь паз, при двухслойной обмотке сторона катушки занимает по высоте только половину паза, т. е. в каждый паз закладывают две стороны катушки, образуя два слоя обмотки. Таким образом при однослойной обмотке число катушек равно половине числа пазов, а при двухслойной – полному числу пазов.

Основной недостаток однослойных обмоток по сравнению с двухслойными – увеличенный (до 20%) расход меди и ограниченные возможности построения схемы обмотки с укороченным шагом и с дробным q для наиболее распространенного вида однослойных обмоток – концентрических. Эти недостатки однослойных обмоток весьма существенны и ограничивают их применение, однако однослойные обмотки позволяют повысить коэффициент заполнения паза за счет отсутствия значительного изоляционного слоя в середине паза.

Перед тем как перейти непосредственно к рассмотрению схем обмоток, следует установить некоторые буквенные обозначения и приемы изображения схем на чертежах.

Основной чертеж схемы в условном виде представляет собой развертку окружности статора или ротора на плоскости. Пазы и стороны уложенных в них катушек изображают прямыми линиями. Схемы двухслойных обмоток в пазовой части показывают двумя рядом расположенными линиями – сплошной и пунктирной, причем сплошная линия обозначает сторону катушки, уложенную в верхнюю часть паза, а пунктирная линия – нижнюю сторону катушки, уложенную на дно паза. Нижний и верхний слон лобовых частей изображают соответственно пунктирными и сплошными линиями. Стрелки на элементах обмотки, проставленные на некоторых схемах, показывают направление *эдс* или токов в соответствующих элементах обмотки в определенный, один и тот же для всех фаз обмотки момент времени.

Начала в концы фаз обмотки статора по ГОСТ 183–66 обозначают таким образом:

начало 1–й фазы	С1	конец 1–й фазы	С4
начало 2–й фазы	С2	конец 2–й фазы	С5
начало 3–й фазы	С3	конец 3–й фазы	С6

выводы обмотки ротора	при 4 выводах на контактных кольцах	при 3 выводах на контактных кольцах
1–я фаза	Р1	Р1
2–я фаза	Р2	Р2
3–я фаза	Р3	Р3
нулевая точка	0	–

Для составления схем трёхфазных обмоток статоров электрических машин переменного тока, помимо указания вида обмотки, должны быть даны определяющие ее параметры: Z_1 – число пазов, $2p$ – число полюсов, $y_{1п}$ – шаг обмотки по пазам, a_1 – число параллельных ветвей в фазе, способ соединения фаз Y – (звезда) или △ – (треугольник).

Однослойные обмотки статора.

Однослойные обмотки подразделяют на концентрические и шаблонные. На рисунке 3 представлена трехфазная схема однослойной концентрической обмотки статора для четырехполюсного электродвигателя, число пазов которого Z_1 = 36 и фазы обмотки соединены в звезду. При составлении схемы руководствуются следующими соображениями:

полюсное деление по пазам

$$\tau_1 = \frac{Z_1}{2p} = \frac{36}{4} = 9$$

число пазов на полюс и фазу

$$q_1 = \frac{Z_1}{2p \times m} = \frac{36}{3 \times 4} = 3$$

В соответствии с этим первую катушечную группу, состоящую из трех катушек, закладывают левыми сторонами катушек в пазы 1, 2 и 3, а правыми сторонами в пазы 10, 11 и 12. Началом первой фазы С1 принимается вывод из левой стороны катушки, заложенной в паз 1. Заключенные между сторонами первой катушечной группы пазы 4–9, а также пазы 13–18 займут катушки двух других фаз. Таким образом следующая катушечная группа первой фазы займет левыми сторонами катушек пазы 19, 20 и 21, правыми сторонами пазы 28, 29 и 30.

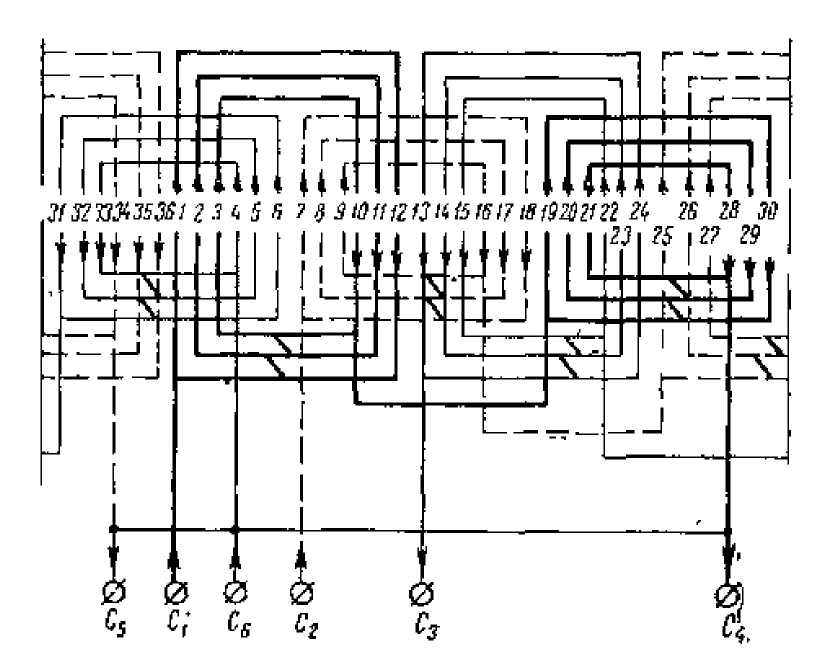


Рис. 3. Схема двухплоскостной однослойной концентрической обмотки, $2p$ = 4, Z_1 = 36.

Для правильного образования полюсов в однослойных обмотках (кроме обмоток, выполненных в "развалку", о чем будет сказано ниже), т. е. в обмотках где число катушечных групп в фазе равно числу пар полюсов, группы должны соединяться разноименными концами (конец первой катушечной группы с началом второй, конец второй катушечной группы с началом третьей и т. д.). Исходя из этого соединяют концы выходящие из пазов 10 и 19.

При этом соединении двух катушечных групп оставшийся свободным вывод из правой стороны катушки, заложенной в паз 28 является выводным концом первой фазы С4.
Начало второй фазы сдвигают от начала первой фазы обычно на 120 эл. град. т. е. на ⅔ полюсного деления. Здесь же следует отметить, что этот сдвиг может быть выполнен на число электрических градусов, равное 120 + 360n или 240 + 360n, где n – любое целое число, и только в целях концентрации всех выводов на одном участке обмотки они сдвигаются на минимально возможное расстояние – на 120 эл. град.
Начало второй фазы С2 должно быть сдвинуто на – ⅔×τ_1, т. е. на ⅔ × 9 = 6 пазов, т. е. располагается в 1 + 6 = 7 пазе.
Следовательно, первая катушечная группа второй фазы займет левыми сторонами катушек пазы 7, 8 и 9, а правыми сторонами пазы 16, 17 и 18. Пазы 19 – 24 займут катушки других фаз, а вторая катушечная группа второй фазы займет левыми сторонами катушек пазы 25, 26 и 27 и правыми сторонами – пазы 34, 35 и 36. Катушечные группы второй фазы соединяют между собой концами катушек выходящих из пазов 16 и 25. Оставшийся свободный вывод из правой стороны катушки, заложенной в паз 34 является выводным концом второй фазы С5.
Начало третьей фазы С3, сдвинутое от начала второй фазы на ⅔ полюсного деления, располагают в пазу 13. В первой катушечной группе третьей фазы левые стороны катушек займут пазы 13, 14 и 15, а правые стороны – пазы 22, 23 и 24. Вторая катушечная группа этой фазы располагается левыми сторонами катушек в пазах 31, 32 и 33 и правыми сторонами в пазах 4, 5 и 6. Соединяют между собой катушечные группы концами, выходящими из пазов 22 и 31, Свободный вывод, выходящий из правой стороны катушки заложенный в паз 4, является выводным концом третьей фазы Для соединения фаз в звезду соединяют выводы С4, С5 и С6.
Чтобы проверить правильность образования полюсов надо указать стрелками направление токов на входных концах фаз С1, С2 и С3.
Как следует из векторной диаграммы фазовых токов трёхфазной системы, в любой момент времени направление тока в начале одной из фаз обмотки всегда противоположно направлению токов в началах двух других фаз. Сообразуясь с этим, проставляют на линии пазов стрелки, показывающие направление тока в сторонах катушек, что и определит правильность образования полюсов в обмотке – их число и чередование, а также правильность соединения фаз между собой.
В однослойной концентрической обмотке шаги катушек в катушечной группе разные: в наружной (самой большой) катушке шаг составляет 4×q_1 – 1, а во внутренней (самой малой) шаг равен 2×q_1 + 1.

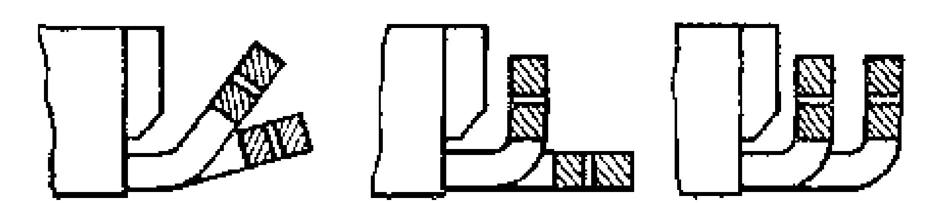


Рис. 4. Расположение лобовых частей двухплоскостной концентрической обмотки.

Средний же шаг всех катушек, входящих в катушечную группу, который является расчетным при определении эдс обмотки, равен:

$$\frac{(4 \times q_1 - 1) + (2 \times q_1 + 1)}{2} = 3 \times q_1 = \frac{Z_1}{2p}$$

т. е. является диаметральным.

По способу расположения лобовых частей обмотку, изображенную на рисунке 3, называют двухплоскостной (двухъярусной), так как в ней лобовые части расположены в двух плоскостях, взаиморасположение лобовых частей которых указано на рисунке 4.
В однослойной обмотке число катушечных групп в фазе равно числу пар полюсов p, следовательно, число катушечных групп всей обмотки будет $3{\times}p$, т. е. $3{\times}p/2$ малых (первой плоскости) катушечных групп и $3{\times}p/2$ больших (второй плоскости) катушечных групп. Число $3{\times}p/2$ может быть целым тогда, когда p четное, т. е. когда число полюсов обмотки $2p$ = 4, 8, 12, 16 и т. д. Это значит, что только при числе полюсов из указанного ряда вся двухплоскостная обмотка может быть распределена на три фазы с равным числом больших и малых катушечных групп в каждой фазе, как это было в обмотке, показанной на рисунке 3 или в обмотке, приведенной для восьмиполюсного двигателя (рис. 5).
Когда число пар полюсов не четное ($2p$ = 6, 10, 14, 18 и т. д,), двухплоскостная обмотка не может быть распределена по фазам с одинаковым числом больших и малых катушечных групп. Она должна иметь так называемую "переходную" катушечную группу, как бы наполовину находящуюся в первой плоскости, наполовину – во второй. Схема такой обмотки для шестиполюсной машины приведена на рисунке 6.
Если еще раз обратиться к рисункам 3 и 5 легко установить, что обмотка на рисунке 3 имеет последовательное соединение катушечных групп в фазе, а обмотка на рисунке 5 – соединение в две параллельное ветви (у последних должны быть одинаковые индуктивные и активные сопротивления для обеспечения равенства проходящих по ним токов). Следовательно, обмотка, изображенная на рисунке 3 при соединении в две параллельные ветви имела бы неодинаковые активные сопротивления, так как в одну параллельную ветвь входила бы малая катушечная группа, а в другую – большая с лобовыми частями разной длины и поэтому с разными активными сопротивлениями. Что касается схемы, изображенной на рисунке 5, то здесь в каждую параллельную ветвь входит по одной малой и одной большой катушечной группе, т, е. соблюден принцип одинаковости активных сопротивлений. Если же обмотку соединить в четыре параллельные ветви, этот принцип нарушится, обмотка получится с разными активными сопротивлениями в параллельных ветвях.
Необходимо заметить, что в асинхронных электродвигателях активное сопротивление фазы обмотки составляет обычно не более 10–12% полного сопротивления, которое в основном зависит от индуктивного.

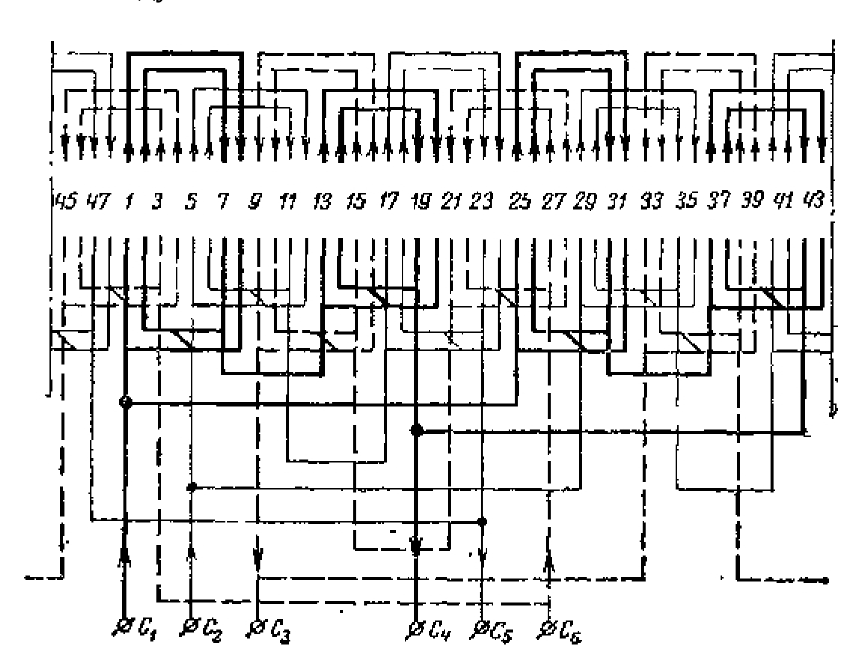


Рис. 5. Схема двухплоскостной концентрической обмотки $2p$ = 8, Z_1 = 48, a_1 = 2.

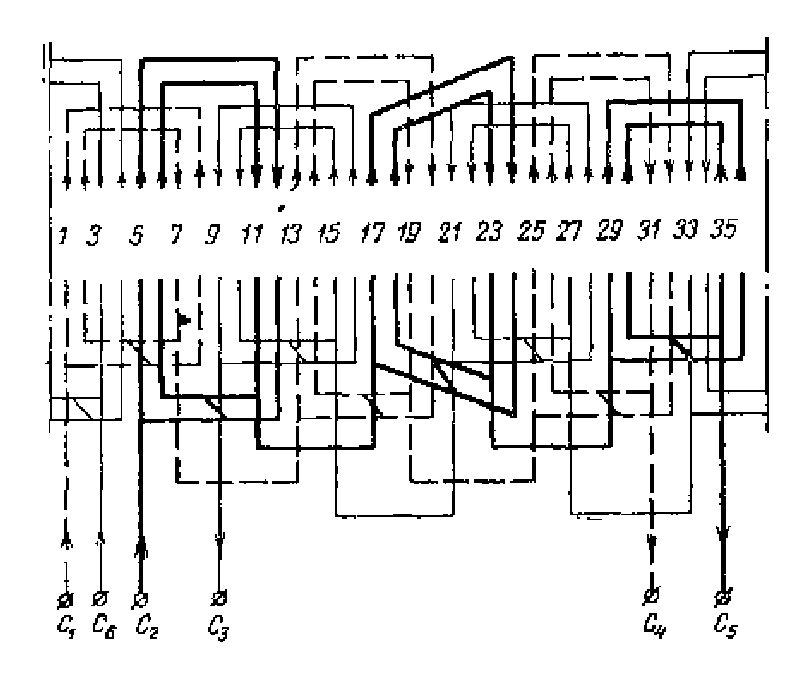


Рис. 6. Схема обмотки с переходной катушечной группой $2p = 6$, $Z_1 = 36$.

И если учесть, что за счет различной длины прямолинейных вылетов большой и малой катушечных групп разница в их активных сопротивлениях будет также порядка 10–12%, то разница в полных сопротивлениях параллельных ветвей (при условии равенства их индуктивных сопротивлений) и значит токов в них составит около 1%, что практически не может повлиять на работу электродвигателя. Это положение служит объяснением применения для двухполюсных электродвигателей трехплоскостных обмоток с катушечными группами различной длины в фазах и соответственно различными активными сопротивлениями фаз обмотки (см. рис. 8).

На рисунке 7 представлена схема обмотки статора четырехполюсного электродвигателя, точно такого же для которого раньше была составлена схема по рисунку 3. Эти схемы отличаются одна от другой тем, что обмотка на рисунке 7 состоит из одинаковых катушечных групп (отсюда ее название – "равнокатушечная"). При соединении этой обмотки в две параллельные ветви не будет разницы в активном сопротивлении параллельных ветвей, и если в обыкновенной однослойной обмотке число видов катушек равно $2 \times q_1$ то в равнокатушечной обмотке оно равно q_1.

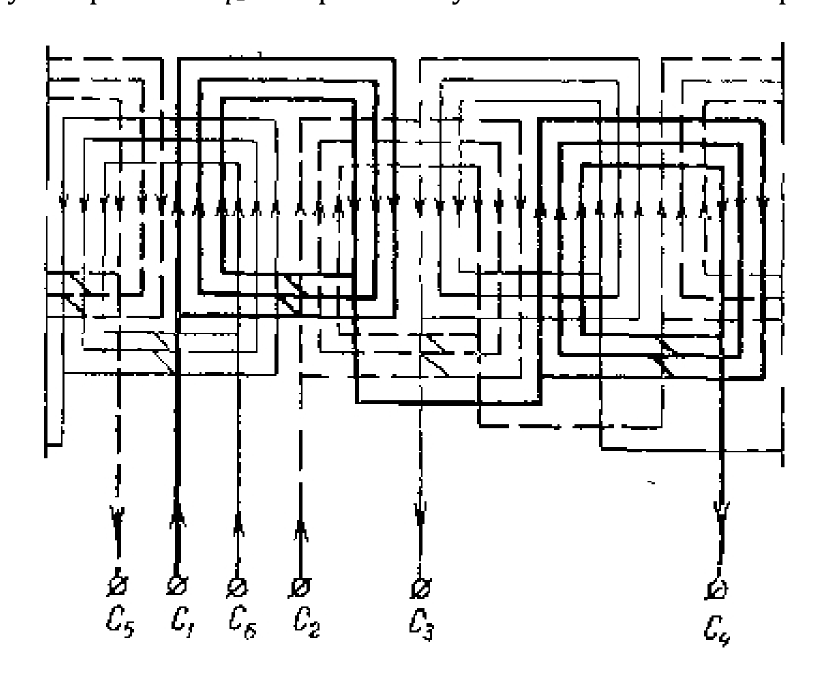
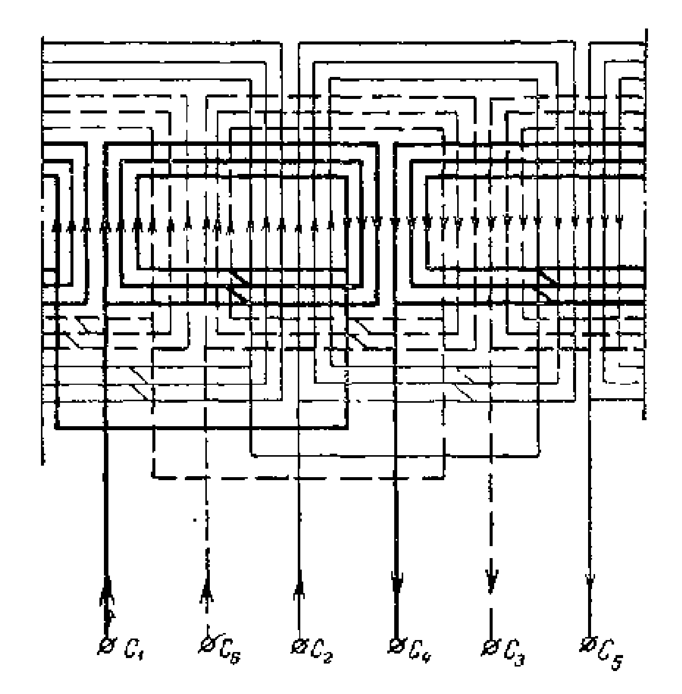


Рис. 7. Схема двухплоскостной концентрической обмотки $2p = 4$, $Z_1 = 36$.

Рис. 8. Схема трехплоскостной концетрической обмотки в "развалку" $2p = 2$, $Z_1 = 36$.



На рисунке 8 представлена очень часто применяемая на практике для двухполюсных электродвигателей схема трехплоскостной обмотки статора (лобовые части обмотки располагаются в трех плоскостях). Здесь лобовые части первой фазы обмотки располагаются только в первой плоскости, второй фазы – только во второй и третьей, третьей фазы – только в третьей плоскости.

Таким образом, как уже говорилось, активные сопротивления фаз в этой обмотке различны. Другой особенностью этой схемы является то, что катушечная группа, состоящая из шести катушек ($q_1 = 6$), разбита на две концентрические полугруппы по три катушки в каждой, т. е. катушечная группа как бы развалена на двое. Отсюда такую обмотку часто называют намотанной "вразвалку".

Способ намотки "вразвалку" дает возможность уменьшить радиальные размеры корпуса электродвигателя за счет небольшого увеличения ее аксиальных размеров, что приводит к довольно ощутимому снижению общего веса электродвигателя.

Рассмотрев различные типы однослойных концентрических обмоток, можно сформулировать основные положения, которыми следует руководствоваться при составлении схемы обмотки.

1. Исходя из технологических условии заготовки и укладки катушек, а также условий эксплуатации электродвигателя, выбирают тип обмотки (двух– или трех– плоскостная, разно– или равнокатушечная).

2. Определяют число катушек в катушечной группе, равное числу q_1.

3. Определяют шаг катушек по пазам. Шаг большой (внешней) катушки в катушечной группе равен $4 \times q_1 - 1$. Например, в обмотке с $q_1 = 4$ шаг внешней катушки равен 15, или, как принято обозначать шаг 1 – 16. Шаг каждой следующей внутренней катушки уменьшается на два пазовых деления, т. е. составит 1 – 14, 1 – 12 и 1 – 10.

4. Определяют, можно ли соединить проектируемую обмотку в требуемое число a_1 параллельных ветвей. Для осуществления этого требования необходимо, чтобы частное $2p/a_1$ было целым числом.

5. Расставляют направления токов под полюсами образованными магнитным полем обмотки, соединяя при помощи межкатушечных соединений отдельные катушки в катушечные группы и при помощи между групповых соединений – катушечные группы в фазы. При этом выбранное направление тока в фазе должно соответствовать стрелкам направления протекания тока во всех катушках фазы.

6. Выбирают катушки из которых должны выходить начала и концы фаз обмотки. Для проверки правильности определения начал и концов фаз следует воспользоваться правилом о направлении токов в фазах, о котором выше уже упоминалось.

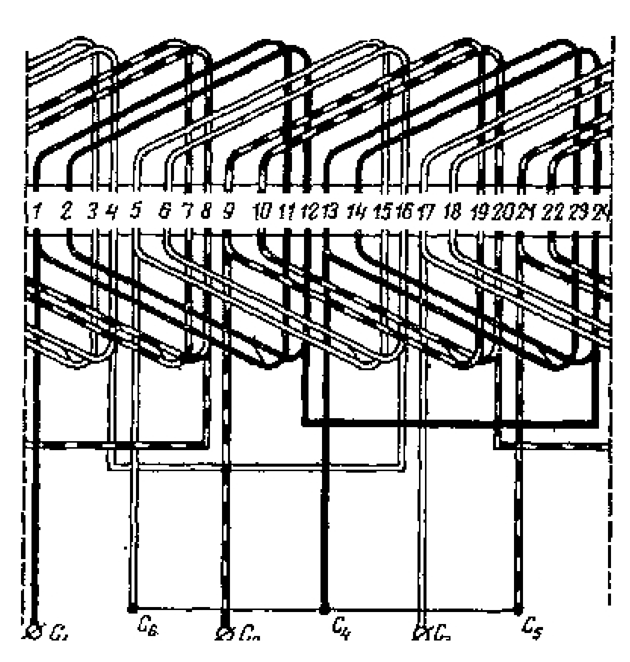
Шаблонные обмотки можно подразделить на простую шаблонную обмотку, шаблонную обмотку "вразвалку" и цепную обмотку.

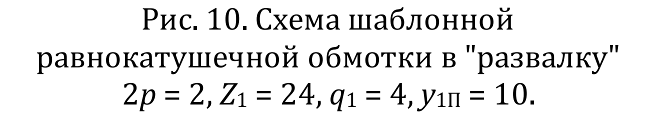
На рисунке 9 приведена полная развернутая схема простой шаблонной обмотки двухполюсного электродвигателя при q_1 = 3. Из схемы видно, что катушки шаблонной обмотки (это относится ко всем типам шаблонных обмоток) имеют трапецеидальную форму. Одна пазовая часть катушки – длинная, другая – короткая. Лобовые части катушек при этом располагаются в двух плоскостях.

Образование катушечных групп и фаз обмотки, определение начал н концов фаз выполняется так же, как и в концентрической обмотке. Положительным качеством этой обмотки является то, что все катушки совершенно одинаковы по форме.

Рис. 9. Схема простой шаблонной обмотки
$2p$ = 2, Z_1 = 18, $y_{1П}$ = 9.

Шаблонная обмотка, так же как и концентрическая, может быть выполнена способом в "развалку". На рисунке 10 изображена схема шаблонной обмотки в "развалку" для двухполюсного электродвигателя при Z_1 = 24.




Рис. 10. Схема шаблонной равнокатушечной обмотки в "развалку"
$2p$ = 2, Z_1 = 24, q_1 = 4, $y_{1П}$ = 10.

Схему на рисунке 10 можно рассматривать как промежуточную между шаблонной обмоткой "вразвалку" и так называемой цепной обмоткой. Цепные обмотки также выполняют "вразвалку".

От предыдущих обмоток эта отличается тем, что в ней короткие и длинные стороны катушек чередуются, т. е. "развалка" производится не по полугруппам, а по катушкам. На рисунках 11 и 12 показаны схемы цепных обмоток соответственно для шести– и четырехполюсного электродвигателя. Для наглядности эти схемы представлены в виде кольцевой развертки. Рассматривая их можно заметить, что короткие стороны катушек лежат в нечетных пазах, длинных – в четных. Но так как каждая катушка состоит из короткой и длинной стороны, то цепную обмотку можно образовать только в том случае, если ее шаг будет не четным.

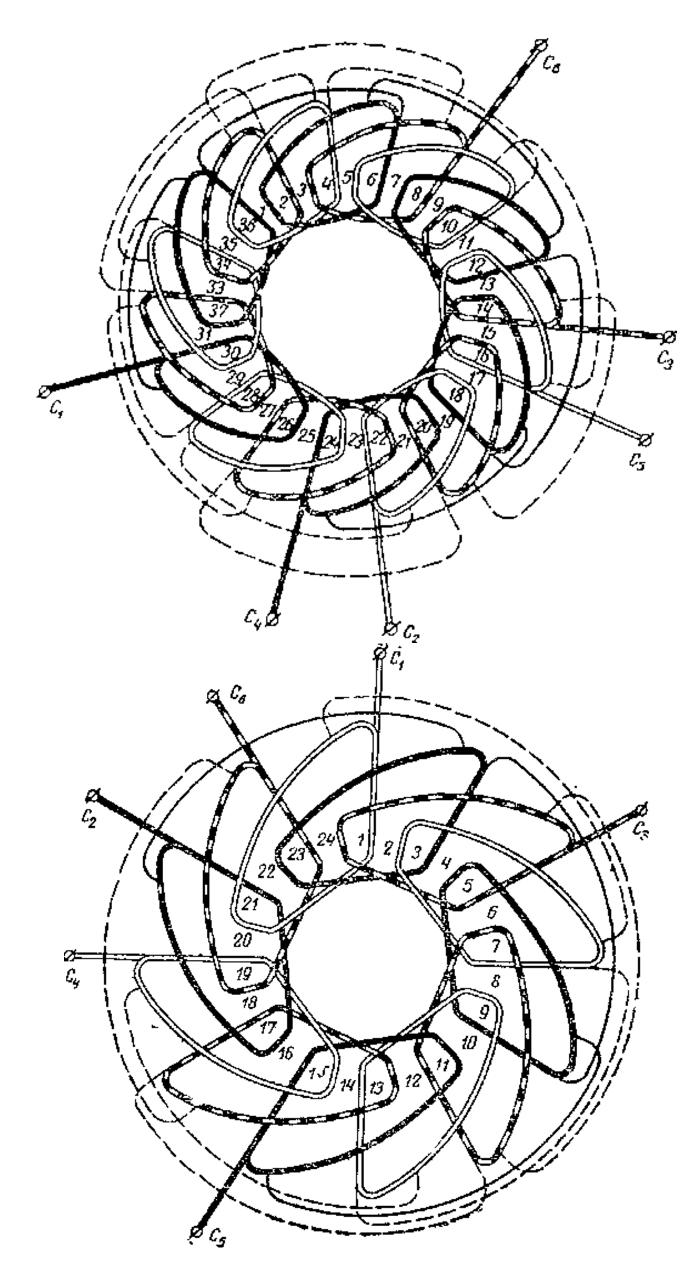


Рис. 11. Схема цепной обмотки
$2p = 6$, $Z_1 = 36$, $q_1 = 2$, $y_{1П} = 5$.

Рис. 12. Схема цепной обмотки
$2p = 4$, $Z_1 = 24$, $q_1 = 2$, $y_{1П} = 5$.

Важно отметить, что обмотки изображенные на рисунках 11 и 12, выполнены с укороченным шагом катушек по пазам. На этой и другой схеме шаг равен 5, в то время как диаметральный шаг этих обмоток равен:

для рисунка 11:

$$Z_1/2p = 36/6 = 6$$

для рисунка 12:

$$Z_1/2p = 24/4 = 6$$

Таким образом цепная обмотка может быть выполнена с укороченным шагом, что даст экономию меди в лобовых частях, хотя по электрическим свойствам она эквивалентна обмотке с диаметральным шагом.

Двухслойные обмотки статора.

Обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу. В статорах электродвигателей переменного тока обмотки чаще всего выполняются двухслойными петлевыми. Все катушки двухслойной обмотки одинаковы, что упрощает и удешевляет их изготовление. Название "двухслойной", как уже об этом упоминалось, обмотка получила потому, что в паз закладываются стороны двух катушек, а каждая катушка располагается на статоре в двух слоях. Один слой обмотки укладывается на дно паза (нижний слой), а другой – в части паза прилегающей к расточке статора (верхний слой). Лобовые части катушки также занимают два слоя, а переход из одного слоя в другой осуществляется в головках катушек.

Преимущества двухслойных петлевых обмоток следующие:

– возможность применения катушек с любым укорочением шага, причем шаг катушки может быть как четным, так и нечетным, сравнительно несложное выполнение обмотки с числом пазов на полюс и фазу любой дробности.

– возможность применения разновитковых катушек для полного использования площади пазов статора, если в результате электромагнитного расчета окажется, что полное число активных проводников в пазу должно быть не четным.

Эти преимущества двухслойной петлевой обмотки позволяют применять ее для статоров асинхронных электродвигателей. В качестве примера, пользуясь принятыми нами ранее условными графическими и буквенными обозначениями, приведем схему двухслойной обмотки со следующими параметрами (рис. 13): $2p = 8$, $Z_1 = 48$, $y_{п1} = 5$, $a_1 = 1$. Так как диаметральный шаг этой обмотки равный полюсному делению:

$$\tau_1 = \frac{48}{8} = 6$$

то укорочение обмотки:

$$\beta_1 = \frac{y_{1П}}{\tau_1} = \frac{5}{6}$$

число пазов на полюс и фазу:

$$q_1 = \frac{Z_1}{2p \times m} = \frac{48}{8 \times 3} = 2$$

В соответствии с этим 1–ю катушечную группу, состоящую из двух катушек, закладывают верхними сторонами катушек в пазы, условно обозначенные 1 и 2, нижними сторонами в пазы 6 и 7. Началом (С1) первой фазы принимают вывод катушки из верха первого паза. Верх пазов 3, 4, 5 и 6 и низ пазов 8, 9, 10 и 11 займут соответственно катушечные группы других двух фаз.

Таким образом, следующая катушечная группа первой фазы займет своими верхними сторонами пазы 7 и 6, а нижними – пазы 12 и 13.

Остальные катушечные группы первой фазы займут верхними сторонами катушек – пазы 13 и 14, 19 и 20, 23 и 26, 31 и 32, 37 и 38, 43 и 44, нижними сторонами катушек – пазы 18 и 19, 24 и 25, 30 и 31, 36 и 37, 42 и 43, 48 и 1.

Для правильного образования и чередования полюсов катушечные группы при последовательном соединении (в нашем случае $a_1 = 1$ – соединение последовательное) соединяют между собой одноименными выводами. При соединении таким способом всех катушечных групп первой фазы получится свободный вывод из верха катушки заложенной в 43–й паз. Этот вывод и является выводным концом первой фазы (С4).

Начало второй фазы сдвигают от начала первой фазы (если q – целое число) на 120 электрических градусов или на ⅔ полюсного деления Так как полюсное деление $\tau_1 = 6$, то начало второй фазы сдвигают на ⅔×6 = 4 паза, т е. располагают в 4 + 1 = в 5 пазе. Аналогично этому начало третьей фазы располагают в 9 пазе.

Концы второй и третьей фазы также сдвинуты от конца первой фазы на $2/3 \times \tau_1$ и находятся соответственно в 47 и 3 пазах.

Необходимо знать, что в одном пазу каждого полюса (пазы 6, 12, 18 и т. д.) есть встречное направление токов в верхней и нижней сторонах катушек, которое происходит вследствие принятого укорочения шага обмотки на один паз (принят шаг равный пяти, по сравнению с диаметральным шагом, равным шести).

При укорочении на два паза по отношению к диаметральному, встречное направление токов будет уже в двух пазах каждого полюса, В этом легко убедиться, если составить схему, отличающуюся от приведенной на рисунке 13 только шагом обмотки 1–5 (вместо 1–6), и обозначить стрелками направления токов во всех элементах обмотки. При диаметральном шаге обмотки встречных направлений токов в одном и том же пазу не будет.

Мы уже упоминали о том, что в зависимости от расчетных данных, катушечные группы в фазе могут быть соединены между собой последовательно или параллельно (в две или несколько параллельных ветвей). На рисунке 14 приведена схема обмотки с параметрами аналогичными обмотке показанной на рисунке 13, но при соединении катушечных групп в две параллельные ветви ($a_1 = 2$).

Возможное число параллельных ветвей a_1 обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу определяется требованием по которому отношение $2p/a_1$ должно выражаться целым числом, так как указанное отношение равно числу катушечных групп приходящихся на каждую параллельную ветвь, а это число, естественно, не может быть дробным. Отсюда следует, что число параллельных ветвей может быть разно 1; 2; p и $2p$ при любом числе полюсов машины. Число параллельных ветвей может быть равно $p/2$, $p/3$, $p/4$, p/n только в обмотках, число полюсов которых делится соответственно на 4, 6, 8, $2n$, т. е число параллельных ветвей может быть равно:

$p/2$	для обмоток имеющих	4, 8, 12, 16	полюсов
$p/3$	для обмоток имеющих	6, 12, 18, 24	полюса
$p/4$	для обмоток имеющих	8, 16, 24, 32	полюса
$p/5$	для обмоток имеющих	10, 20, 30, 40	полюсов
$p/6$	для обмоток имеющих	12, 24, 36, 48	полюсов

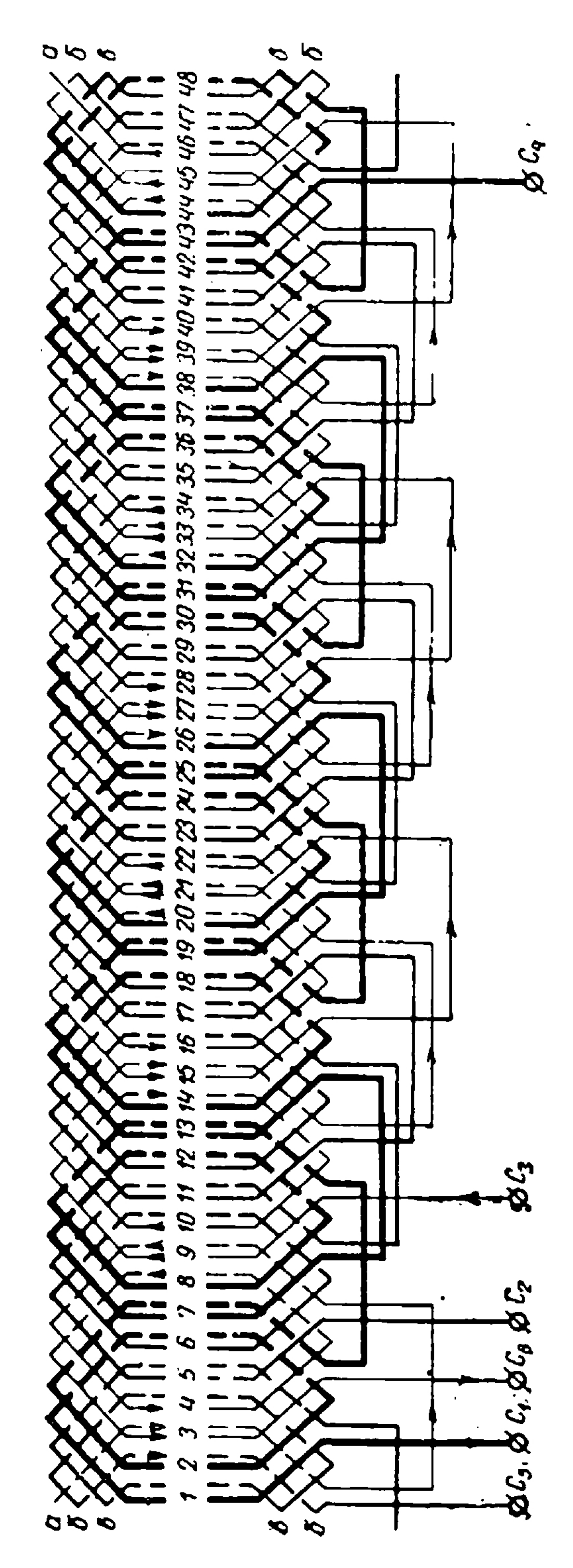


Рис. 13. Схема двухслойной обмотки $2p = 8$, $Z_1 = 48$, $y_{1п} = 5$, $a_1 = 1$.

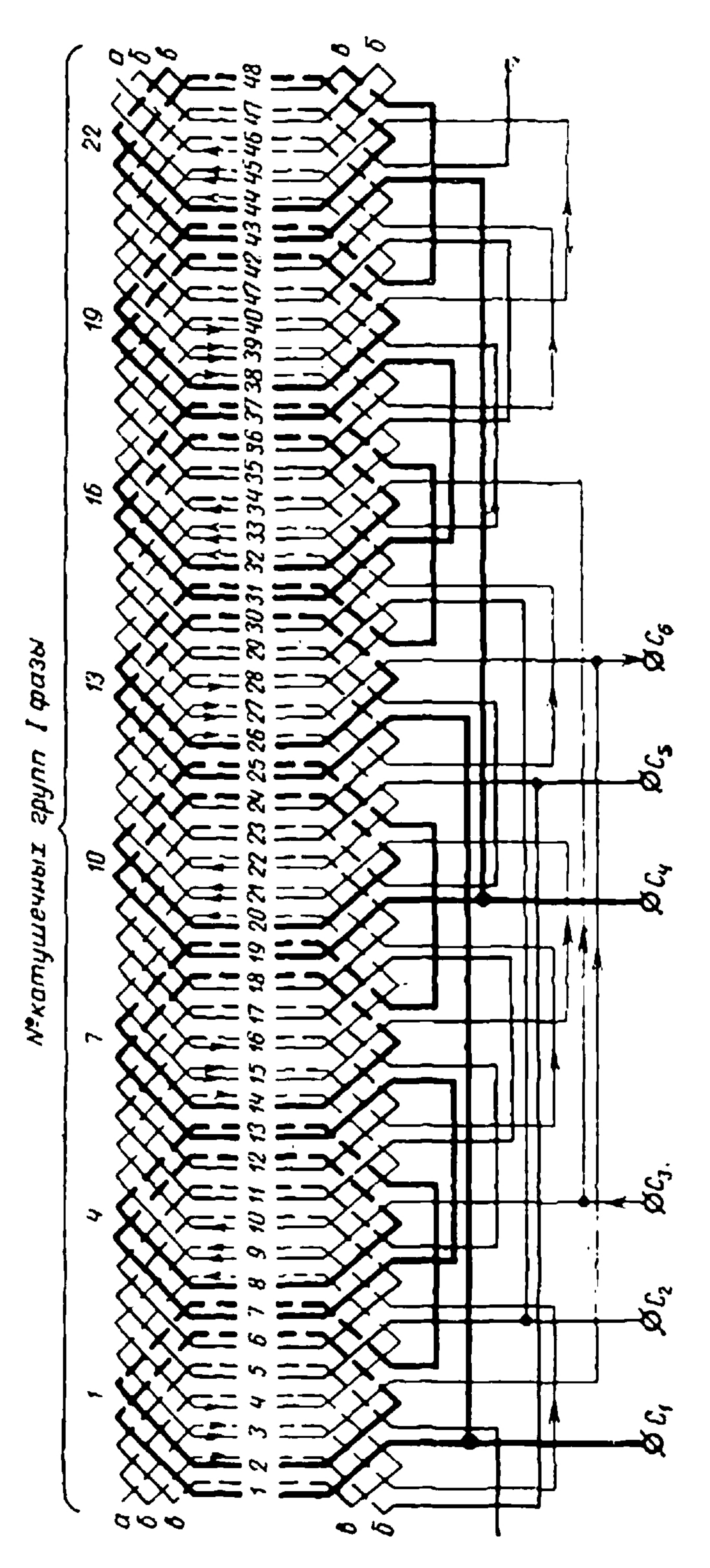


Рис. 14. Схема двухслойной обмотки $2p = 8$, $Z_1 = 48$, $y_{1П} = 5$, $a_1 = 2$.

Обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу. Выше упоминалось, что одним из свойств двухслойных обмоток является возможность выполнения их с q_1 числом пазов на полюс и фазу любой дробности.
В асинхронных двигателях следует избегать обмоток с дробным q_1 и лишь в крайнем случае их применять, но с q_1 имеющим знаменатель равный двум. Тем не менее электромашиностроительные заводы довольно часто выполняют обмотки с дробным q_1 так как это позволяет использовать один и те же штампы для вырубки листов стали для различных типоисполнений электродвигателей.
При ремонте электродвигателей приходится сталкиваться с обмотками у которых q_1 дробное. Представим себе такой случай. Асинхронный электродвигатель с параметрами обмотки статора: $Z_1 = 72$; $2p = 12$; $a_1 = 1$ модернизируется при ремонте с увеличением мощности за счет повышения его номинальной частоты вращения (синхронной) nc = 500 *об. мин*. ($2p = 12$) до nc = 600 *об. мин*. ($2p = 10$).

до модернизации: $q_1 = Z_1/(2p \times 3) = 72/(12 \times 3) = 2$.
после модернизации: $q_1 = 72/(10 \times 3) = 2\frac{2}{5}$.

Как указывалось, число q_1 определяет число катушек в катушечной группе. Дробное q_1 означает, что в обмотке не все катушечные группы одинаковы. Одни из них состоят из большего числа катушек и называются большими катушечными группами, другие – с меньшим число катушек называются малыми. В общем случае дробное число пазов на полюс и фазу представляется в виде целого числа и правильной дроби:

$$q_1 = b + \frac{c}{d}$$

Для нашего примера $b = 2$, $c = 2$, $d = 5$.
При составлении схемы часть катушечных групп комплектуется из "$b + 1$" катушек (большие катушечные группы), а часть из "b" катушек (малые катушечные группы). Количество больших в малых катушечных групп в каждой фазе, а следовательно, и во всей обмотке определяется дробной частью (c/d) числа q_1. В применении к выбранному нами примеру на каждые d = 3 катушечных групп во всей обмотке (также и в фазе) приходится c = 2 больших катушечных групп, состоящих из $b + 1 = 3$ катушек и d – c = 3 малых катушечных групп, состоящих из $b = 2$ катушек. Для выполнения схемы обмоток остается только определить порядок чередования больших и малых катушечных групп по окружности статора.
Так как на каждые d катушечных групп по всей окружности статора будет приходиться c и d – с соответственно больших и малых, то первые d катушечных групп называют периодом чередования и записывают (по данным нашего примера): (23232), или в любом другом распределении: (22233), (23322), (3222 3) и т. д.
Выбрав какое–либо распределение для периода чередования, повторяют его столько раз, сколько раз число d содержится в полном количестве катушечных групп всей обмотки, т. е. $3 \times 2p/d$ раз. Для выбранного нами примера период чередования повторяется $3 \times 10/5 = 6$ раз и полное чередование катушечных групп по окружности статора примет вид:

(2 3 2 3 2), (2 3 2 3 2), (2 3 2 3 2)
(2 3 2 3 2), (2 3 2 3 2), (2 3 2 3 2)

Практически для полной характеристики чередования катушечных групп всей обмотки достаточно записать (23232) и т д. На рисунке 15 приведена схема соединений обмотки с $q_1 = 1\frac{1}{2}$ в которой группы из двух и одной катушек чередуются между собой.
Распределение больших и малых катушечных групп внутри периода чередования может быть совершенно произвольным. Любое из приведенных выше в нашем примере распределений обеспечивает правильное выполнение схемы обмотки.

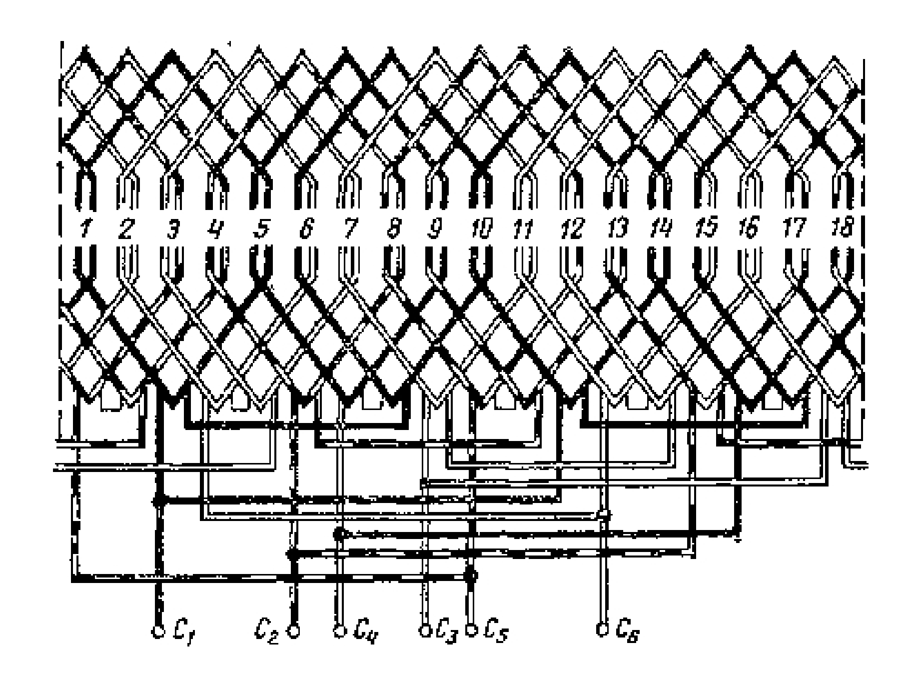


Рис. 15. Схема двухслойной обмотки $2p = 4$, $Z_1 = 18$, $q_1 = 1\frac{1}{2}$

Практически принято распределять большие и малые катушечные группы внутри периода чередования по возможности равномерно.

Исходя из этого положения, рекомендуем наиболее простой, проверенный практикой способ определения чередований для двухслойных петлевых обмоток с числом любой дробности. Так например, требуется составить чередование катушечных групп по окружности статора при $q = 2^3/_{10}$, По виду дроби определяем, что чередование будет состоять из 7 двухкатушечных и 3 трехкатушечных групп. Выписываем строчку из 7 двоек:

22 ↑ 22 ↑ 22 ↑ 2

Стараясь по возможности равномерно распределить большие и малые катушечные группы, в указанные стрелками промежутки вставляем тройки; получаем законченное чередование.

(22 3 22 3 22 3 2)

Если $q_1 = 2^7/_{10}$ то трехкатушечных групп будет больше, чем двух катушечных, поэтому первую строчку составляем из семи троек, а между ними расставляем двойки. Проверить приемлемость выбранного распределения катушечных групп внутри периода чередования требуется лишь в том случае, если в составляемой схеме необходимо выполнить параллельные ветви. Число возможных параллельных ветвей в двухслойных петлевых обмотках с дробным q_1 определяется из соотношения:

$$\frac{2p}{a_1 \times d} = \text{целому числу.}$$

Все сказанное выше о трехфазных обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу справедливо для всех значений кроме тех, когда знаменатель дробности d равен или кратен 3. В этом последнем случае получается так называемая не симметричная трехфазная обмотка, где фазные напряжения не одинаковы по величине и сдвинуты друг относительно друга на угол не точно равный 120° или 240°.

Схемы обмоток фазовых роторов.

В фазовых роторах асинхронных электродвигателей применяют преимущественно волновые обмотки с двумя стержнями в пазу, уложенными в два слоя. Эти обмотки обычно выполняют с целым числом пазов на полюс и фазу q_2 диаметральным шагом равным полюсному делению τ_2 (за исключением так называемых переходных шагов) и одной ветвью в фазе a_2 = 1. Иногда применяют волновые обмотки с дробным q_2, но в этом случае знаменатель дробности равен двум. Обмотки с другим показателем дробности встречаются редко и здесь не рассматриваются.

Роторы с обмотками, имеющими дробное q_2, выпускаются электромашиностроительными заводами в том случае, если необходимо использовать один и тот же штамп для вырубки листов электродвигателей с разным числом полюсов. Например при использовании штампа двухполюсного электродвигателя у которого q_2 равно 5, для четырехполюсного электродвигателя у которого в этом случае q_2 равно 2,5.

На рисунке 16 представлена схема соединения обмотки Z_2 = 36; $2p$ = 4 и q_2 = 3. Для наглядности приведена схема соединений только для одной первой фазы. Порядок составления схемы следующий, на чертеже развертки пазов ротора отмечают группы пазов относящихся к первой фазе. При этом руководствуются тем, что каждая из групп содержит q_2 пазов (в пашем случае 3 паза) и между группами заключается $2 \times q_2$, т. е. 6 пазов. Естественно, что число таких групп равно числу полюсов $2p$ = 4. За первый паз удобней принять крайний правый в какой–нибудь из указанных групп. Таким образом, четыре группы составятся из пазов: 35, 36 и 1; 8, 9 и 10; 17, 18 и 19; 26, 27 и 28.

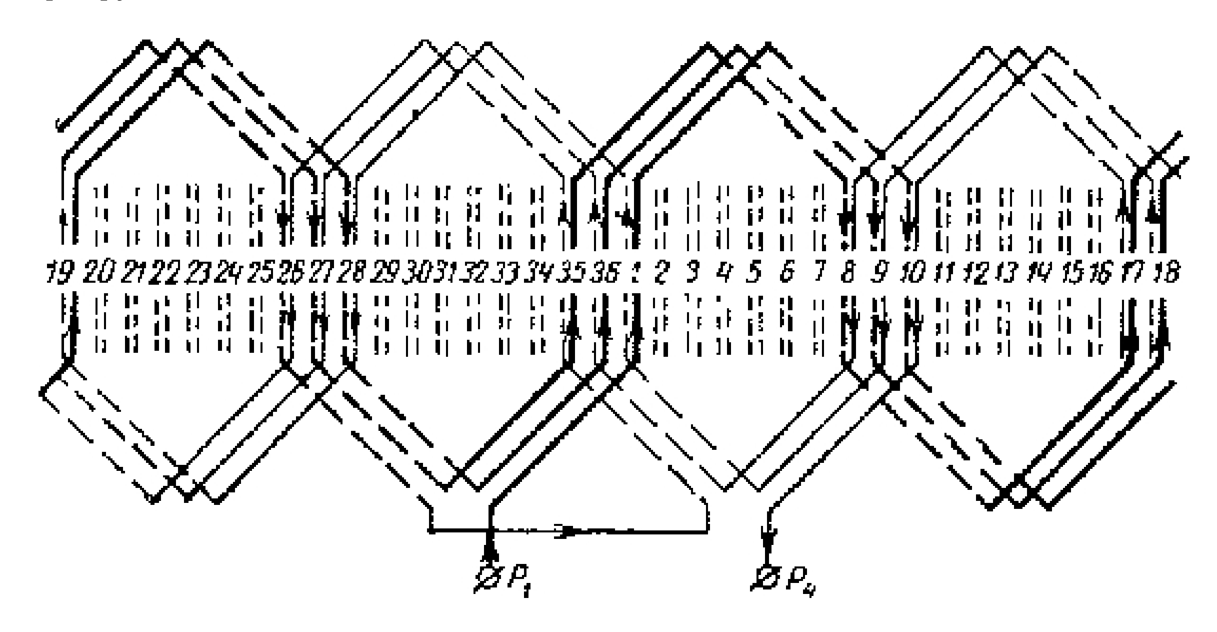


Рис. 16. Схема стержневой волновой обмотки ротора $2p$ = 4, Z_2 = 36, q_2 = 3.

Верхний стержень паза 1 принимают за начало первой фазы (P1). Затем n раз (в нашем случае 3 раза) обходят окружность ротора в направлении, определяемом стрелкой на вводе. сделав при каждом обходе $2p$ – 1 (3) диаметральных шага и один последний шаг укороченный на один паз. Следует отметить, что если бы последний шаг (называемый переходным) не был укорочен, то обмотка замкнулась бы на себя. Этого замыкания обмотки так же можно избежать, если переходный шаг не укоротить, а удлинить на одни паз, т. е. применить удлиненный переходной шаг. Обмотка с удлиненным переходным шагом менее конструктивна, лобовые части ее в местах соответствующих переходов имеют большие вылеты по сравнению с другими лобовыми частями. Однако некоторыми заводами применяются роторные обмотки с удлиненным шагом. При ремонте таких обмоток увеличивается возможность использования старой меди стержней путем перевода обмотки на укороченный шаг.

В рассматриваемой схеме первые три обхода займут пазы:

первый обход 1 верх – 10 низ – 19 верх – 28 низ
второй обход 36 верх – 9 низ – 18 верх – 27 низ
третий обход 35 верх – 5 низ – 17 верх – 26 низ

После q_2 = 3 обходов занятыми оказались только половина пазов первой фазы. Для того чтобы занять вторую половину пазов, обеспечив при этом правильное образование полюсов, делают еще такое же количество обходов, но в противоположном направлении– Эти обходы начинают с нижнего стержня паза 35 (паз является левым в группе пазов, с которой была начата обмотка), а между стержнями в пазах 26 и 35 (в общем случае между пазами $Z_2 + 2 - 4\times q_2$ и $Z_2 + 2 - q_2$) устанавливают перемычку. Последующие обходы займут пазы:

четвертый обход 35 низ – 26 верх –11 низ – 8 верх
пятый обход 36 низ – 27 верх – 18 низ – 9 верх
шестой обход 1 низ – 28 верх – 19 низ – 10 верх

Верхний стержень 10–го паза явится выводным концом первой фазы (Р4). Применяется и довольно распространен другой вариант второй группы обходов, при котором за начало обхода принимают нижний стержень паза 17 (паза $Z_2 + 2 - 7\times q_2$). Порядок обходов при этом варианте:

четвертый обход 17 низ – 8 верх – 35 низ – 26 верх
пятый обход 18 низ – 9 верх – 36 низ – 27 верх
шестой обход 19 низ – 10 верх – 1 низ – 28 верх

Верхний стержень 28–го паза явится концом первой фазы По своим электрическим показателям первый и второй варианты обходов идентичны.
Во избежание небаланса при вращении ротора начала двух других фаз располагают симметрично по окружности ротора, сдвигая их по отношению друг к другу на 120 геометрических градусов При этом, естественно, должна быть соблюдена также электрическая симметрия, условием которой является сдвиг начал фаз на $120+n\times360$ или $240+n\times360°$ (эл. град). Так как вся рассматриваемая обмотка содержит 720° (эл. град), то симметричное расположение по окружности и начала фаз соответствует 240°, что удовлетворяет условиям симметрии.
Следует указать, что при числе полюсов кратном трем, электрически симметричная обмотка невыполнима при сдвиге начал фаз на 120 геометрических градусов, вследствие чего ротор обычно нуждается в уравновешивании балансировочными грузами. В этих случаях, для более равномерного распределения начал фаз их располагают со сдвигом между собой на $4\times q_2\times n$ пазов, где n – любое число, чаще всего равное единице.
В рассматриваемой же нами обмотке, располагая начало второй фазы (Р2) и третьей фазы (Р3) симметрично по окружности в пазах 25 и 13 и произведя обходы пазов каждый из этих фаз в том же порядке и с теми же шагами, как это было выполнено для первой фазы, получаем схему всей обмотки изображенную на рисунке 17. Схема обмотки с аналогичными параметрами, но с удлиненным переходным шагом показана на рисунке 18.

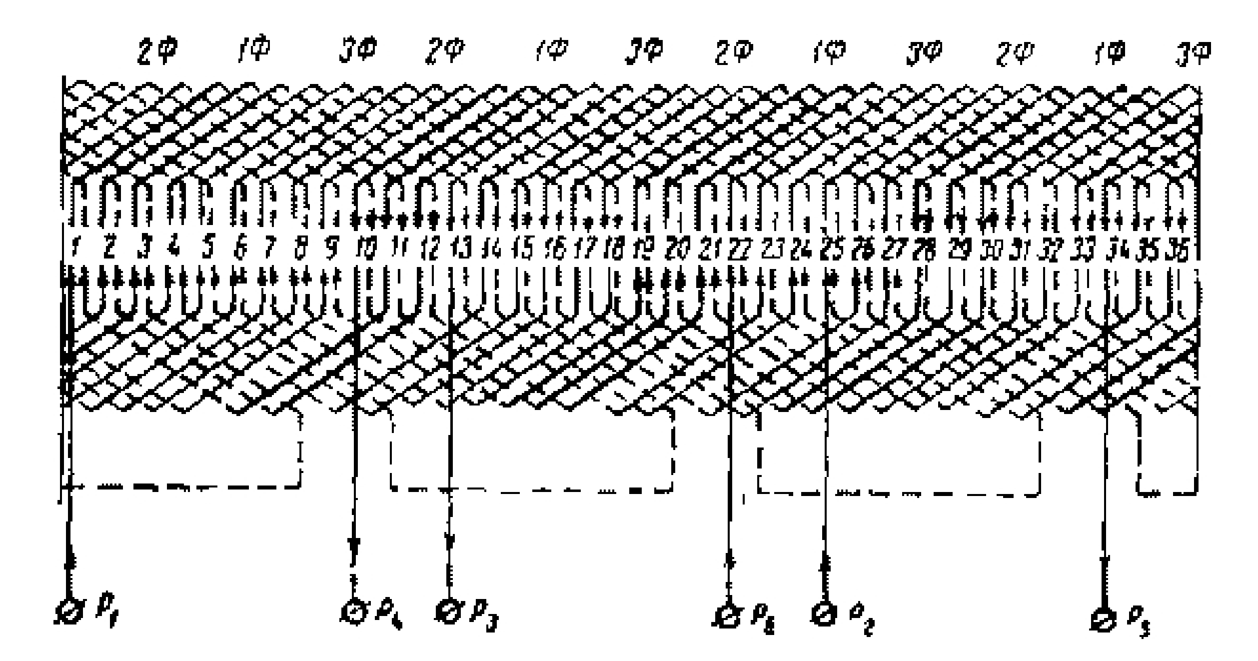


Рис. 18. Схема обмотки ротора с удлиненными переходами $2p = 4$, $Z_2 = 36$, $q_2 = 3$.

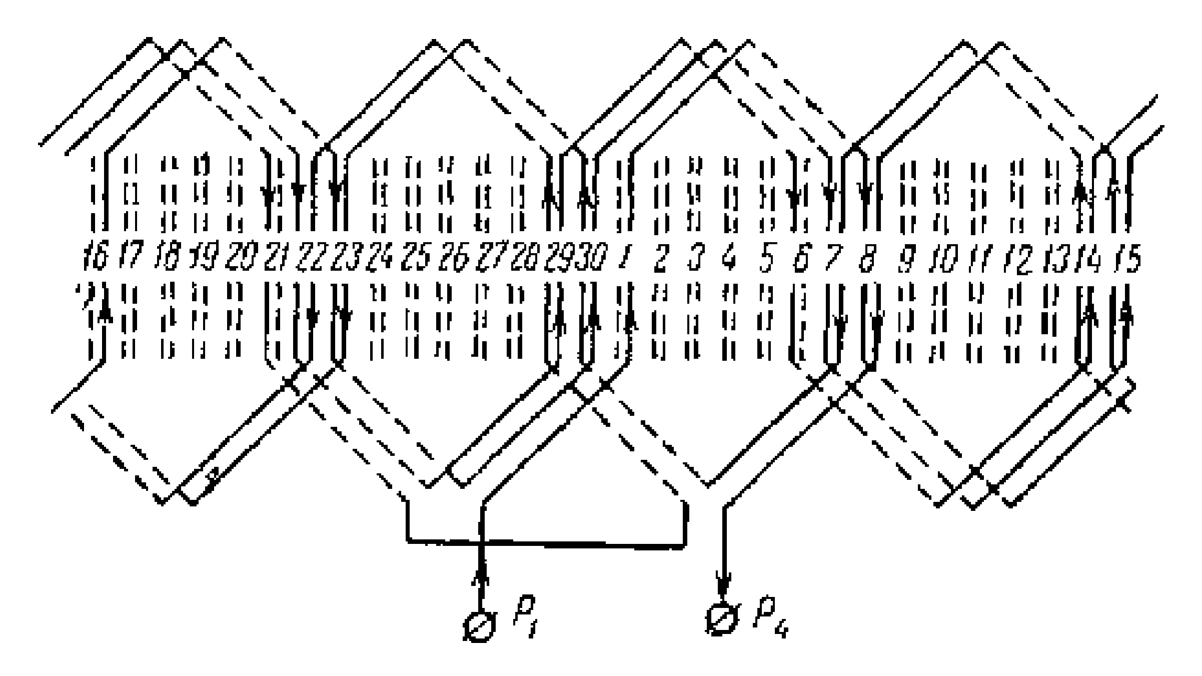


Рис. 19. Схема обмотки ротора с дробным числом пазов на полюс и фазу $2p = 4$, $Z_2 = 30$, $q_2 = 2½$.

Как говорилось, иногда применяют обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу с показателем дробности ½. При $q_2 = b + ½$, где b целое число, количество пазов приходящихся на один полюс, составляет $3 \times b + 1½$, что также не является целым числом и поэтому шаг обмотки не может быть диаметральным. Вследствие этого такие обмотки выполняют с разными шагами с передней и задней сторон ротора. Обычно с передней стороны ротора принимают шаги $3 \times b + 1$, а с задней – $3 \times b + 2$.

При обходе ротора указанными шагами, чтобы не замкнуть обмотку на себя, последний шаг обхода с передней стороны делают укороченным на один паз, аналогично тому, как это применялось в обмотках с целым числом пазов на полюс и фазу. Число обходов в первой половине обмотки отличаемся от числа обходов во второй половине обмотки на единицу. Схема обмотки (одной фазы) для электродвигателя с параметрами $Z_2 = 30$, $2p = 4$ и $q_2 = 2½$ представлены на рисунке 19.

В некоторых случаях в обмотке применяют комбинирование укороченного и удлиненного шагов. При этом становится возможным избежать перекрещивания выводных концов с перемычками в фазах, что упрощает конструктивное выполнение выводов обмотки. Для составления схемы роторной волновой обмотки с укороченными переходами при разном числе полюсов и пазов следует пользоваться таблицей 3.

Таблица 3.

$2p$	Z	q	шаги			номера верхних стержней начал фаз			номера нижних стержней для перемычек в фазах			номера нижних стержней концов фаз		
			задний	передний	переходной	I	II	III	I	II	III	I	II	Ш
4	18	1,5	4	5	4	1	7	13	13, 18	1, 6	7, 12	5	11	17
4	24	2,0	5	6	5	1	19	17	18, 24	2, 8	10, 16	7	15	23
4	30	2,5	7	8	7	1	11	21	21, 29	1, 9	11, 19	8	18	28
4	36	3,0	9	9	8	1	13	25	26, 35	2, 11	14, 23	10	22	34
4	42	3,5	10	11	10	1	15	29	29, 40	1, 12	15, 26	11	25	39
4	48	4,0	12	12	11	1	17	33	34, 46	2, 14	18, 30	13	29	45
4	54	4,5	13	14	13	1	19	37	37, 51	1, 15	19, 33	14	32	50
4	60	5,0	15	15	14	1	21	41	42, 57	2, 17	22, 37	16	36	56
4	66	5,5	16	17	16	1	23	45	45, 62	1, 18	23, 40	17	39	61
4	72	6,0	18	18	17	1	25	49	50, 68	2, 20	26, 44	19	43	67
4	84	7,0	21	21	20	1	29	57	58, 79	2, 23	30, 51	22	50	78
4	96	8,0	24	24	23	1	33	65	66, 90	2, 26	34, 58	25	57	89
6	27	1,5	4	5	4	1	7	22	22, 27	1, 6	16, 21	5	11	26
6	36	2,0	6	6	5	1	9	29	30, 36	2, 8	22, 28	7	15	35
6	45	2,5	7	8	7	1	11	36	36, 44	1, 9	26, 34	8	18	43
6	54	3,0	9	9	8	1	13	43	44, 53	2, 11	32, 41	10	22	52
6	62	3,5	10	11	10	1	15	50	50, 61	1, 12	36, 47	11	25	60
6	72	4,0	12	12	11	1	17	57	58, 70	2, 14	42, 54	13	29	69
6	81	4,5	13	14	13	1	19	64	64, 78	1, 15	46, 60	14	32	77
6	90	5,0	15	15	14	1	21	71	72, 87	2, 17	52, 67	16	36	86
6	99	5,5	16	17	16	1	23	78	78, 95	1, 18	56, 73	17	39	94
6	108	6,0	18	18	17	1	25	85	86, 104	2, 20	62, 80	19	43	103
6	126	7,0	21	21	20	1	29	99	100, 121	2, 23	72, 93	22	50	120
6	144	8,0	24	24	23	1	33	113	114, 138	2, 26	82, 106	25	57	137
6	36	1,5	4	5	4	1	13	25	31, 36	7, 12	19, 24	5	17	29
8	48	2,0	6	6	5	1	17	33	42, 48	10, 16	26, 32	7	23	39
8	60	2,5	7	8	7	1	21	41	51, 59	11, 19	31, 39	8	28	48
8	72	3,0	9	9	8	1	25	49	62, 71	14, 23	38, 47	10	34	58
8	84	3,5	10	11	10	1	29	57	71, 82	15, 26	43, 54	11	39	67
8	96	4,0	12	1	11	1	33	65	82, 94	18, 30	50, 62	13	45	77
8	108	4,5	13	14	13	1	37	73	91, 105	19, 33	55, 69	14	50	86
8	120	5,0	15	15	14	1	41	81	102, 117	22, 37	62, 77	16	56	96
8	132	5,5	16	17	16	1	45	89	111, 128	23, 40	67, 84	17	61	105
8	144	6,0	18	18	17	1	49	97	122, 140	26, 44	74, 92	19	67	115
8	168	7,0	21	21	20	1	57	113	142, 163	30, 51	86, 107	22	78	134
8	192	8,0	24	24	24	1	65	129	162, 166	34, 56	98, 122	25	89	153
10	45	1,5	4	5	4	1	16	31	40, 45	10, 15	25, 30	5	20	35
10	60	2,0	6	6	5	1	21	41	54, 60	14, 20	34, 40	7	27	47
10	75	2,5	7	8	7	1	26	51	66, 74	16, 24	41, 49	8	33	58
10	90	3,0	9	9	8	1	31	61	80, 89	20, 29	50, 59	10	40	70
10	105	3,5	10	11	10	1	36	71	92, 103	22, 33	57, 68	11	46	81
10	120	4,0	12	12	11	1	41	81	106, 118	26, 38	65, 78	13	53	93
10	135	4,5	13	14	13	1	46	91	118, 132	28, 42	73, 87	14	59	104
10	150	5,0	15	15	14	1	51	101	132, 147	33, 47	82, 97	16	66	116
10	165	5,5	16	17	16	1	56	111	144, 161	34, 51	89, 105	17	72	127

продолжение таблицы 3.

$2p$	Z	q	шаги			номера верхних стержней начал фаз			номера нижних стержней для перемычек в фазах			номера нижних стержней концов фаз		
			задний	передний	переходной	I	II	III	I	II	III	I	II	Ш
12	54	1,5	4	5	4	1	16	40	49, 54	10, 15	34, 39	5	20	44
12	72	2,0	6	6	5	1	21	50	66, 72	14, 20	46, 52	7	27	59
12	90	2,5	7	8	7	1	26	66	81, 89	16, 24	56, 64	8	33	73
12	106	3,0	9	9	8	1	31	79	98, 107	20, 29	68, 77	10	40	88
12	126	3,5	10	10	10	1	36	92	113, 124	22, 33	78, 89	11	46	102
12	144	4,0	12	12	11	1	41	105	130, 142	26, 38	90, 102	13	53	117
12	162	4,5	13	14	13	1	46	118	145, 159	28, 42	100, 114	14	59	131

Расчеты обмоток.

Поверочный расчет статора электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

Как указывалось, поверочный расчет проводится для случая, когда электродвигатель, поступивший в ремонт не включен в альбом обмоточных данных, но имеет заводской паспортный щиток и обмотку сохранившуюся в такой степени, что представляется возможным безошибочно определить обмоточные данные электродвигателя, тип и схему обмотки, число эффективных проводов в пазу, число элементарных проводников в эффективном проводе, диаметр и марку провода и др.
Задача расчета заключается в вычислении электромагнитных нагрузок, степени (коэффициента) заполнения паза медью и сравнении вычисленных данных с допустимыми значениями установленными длительным опытом проектирования и изготовления асинхронных электродвигателей.
Если выяснено, что электромагнитные нагрузки и коэффициент заполнения паза находятся в допустимых пределах, то есть все основания считать, что обмоточные данные электродвигателя соответствуют его паспортному щитку и если при ремонте требуется сохранить его основные параметры – мощность, номинальное напряжение и частоту вращения, то можно полностью повторять существующие обмоточные данные полностью копируя существующую обмотку.
Большое отличие вычисленных значений электромагнитных нагрузок и коэффициента заполнения паза от допустимых может быть в результате ошибок допущенных во время предыдущих ремонтов. Не исключено, что паспорт и обмоточные данные не соответствуют друг другу из–за того, что предыдущий ремонт электродвигателя проводился с изменением номинальных параметров, но это не было отражено на заводском щитке. Также возможно, что завод–изготовитель по какой–либо производственной причине намеренно отошел от оптимального технического решения. Одной из таких причин может быть желание использовать существующие вырубные штампы от какой–нибудь определенной машины для штамповки листов стали к другой электрической машине с близкими, но не полностью совпадающими параметрами.

Исходные данные.

На основании паспортных и обмоточных данных, а также снятых с натуры размеров электродвигателя определяют необходимые для расчета величины.
Число полюсов электродвигателя:

$$2p = \frac{120 \times f}{n_{\text{С}}} \quad (1)$$

где f – частота тока в питающей сети, *гц*; $n_{\text{С}}$ – синхронная частота вращения электродвигателя (частота вращения магнитного поля статора).

Для частоты 50 *гц*:

$$2p = \frac{6000}{n_С} \quad (2)$$

На паспортном щитке электродвигателя указывается не синхронная частота вращения, а действительная n, отличающаяся от синхронной на величину скольжения. Скольжение при номинальной мощности электродвигателя выражается в процентах по отношению к синхронной частоте вращения:

$$s = 100 \times \frac{n_С - n}{n_С}\% \quad (3)$$

и составляет в зависимости от мощности электродвигателя 1,5–5%. Таким образом, для определения числа полюсов, следует частное от деления 6000 на число указывающее действительную скорость вращения уменьшить на 1,5–5% до ближайшего целого четного числа.
Полюсное деление, *см*.:

$$\tau_1 = \frac{\pi \times D_1}{2p} \quad (4)$$

где D_1 – внутренний диаметр статора (диаметр расточки), *см*.
Зубцовый шаг, *см*.:

$$t_{13} = \frac{\pi \times D_1}{Z_1} \quad (5)$$

где Z_1 – число пазов статора.
Активная длина сердечника статора, *см*:

$$l_{a1} = k \times (l_1 - n_{1К} \times b_{1К}) \quad (6)$$

где l_1 – полная длина сердечника, включая радиальные вентиляционные каналы, *см*., $n_{1К}$ – число вентиляционных каналов, $b_{1К}$ – ширина вентиляционного канала, *см*., k – коэффициент заполнения сердечника стали, зависящий от толщины листов, вида межлистовой изоляции, а также учитывающий не плотное прилегание листов друг к другу (значение коэффициента k приведено в таблице 4).

Таблица 4.

толщина листов статора, *мм*.	значение k		
	бумага	лак	без изоляции или с оксидной изоляцией
0,5	0,9	0,93	0,95
0,35	0,87	0,91	0,93

Площадь паза $Q_{1П}$, *см*^{2}. Наиболее распространенные формы пазов и формулы для определения их площадей приведены на рисунке 1.

Расчетная ширина зубца, *см*.:

$$b_{13} = \frac{2 \times b'_{13}}{3} + \frac{b''_{13}}{3} \quad (7)$$

где: b'_{13} – ширина зубца в его самом узком месте, *см*., b''_{13} – ширина зубца в его самом широком месте, *см*.
Как указывалось, задачей поверочного расчета является определение электромагнитных нагрузок коэффициента заполнения паза и сравнение их с допустимыми величинами.

Для статора характерными величинами являются:

$B\delta$ – индукция в воздушном зазоре, *Т.*
$B_{1С}$ – индукция в спинке, *Т.*
B_{13} – индукция в зубцах, *Т.*
J_1 – плотность тока, $А/мм^2$.
A_1 – линейная нагрузка, *А/см*.
K_1 – коэффициент заполнения паза.

Значения электромагнитных нагрузок асинхронных электродвигателей с обмоткой из медного провода в зависимости от их мощности указаны в таблице 5.

Таблица 5.

наименование	обозначение	единица измерения	значение нагрузок при мощности, *квт*,			
			свыше 100	10 – 100	1 – 10	до 1
индукция в воздушном зазоре	$B\delta$	*Т*	1,0–0,9	0,9–0,7	0,7–0,6	0,6–0,3
индукция в спинке статора	$B_{1С}$	*Т*	1,7–1,4	1,6–1,3	1,6–1,2	1,5–1,1
индукция в спинке ротора	$B_{2С}$	*Т*	1,4–1,2	1,3–1,2	1,2–1,0	1,1–0,9
индукция в зубцах статора	B_{13}	*Т*	2,0–1,8	1,8 –1,4	1,6–1,4	1,5–1,3
индукция в зубцах ротора	B_{23}	*Т*	1,8 –1,6	1,6–1,4	1,4–1,3	1,3–1,1
плотность тока в обмотке статора	J_1	$А/мм^2$	5–3	5,5–4	6–5	8–6
плотность тока в фазовой обмотке ротора	J_2	$А/мм^2$	5,5–5	6–5,5	–	–
плотность тока в стержнях короткозамкнутого ротора	$J_С$	$А/мм^2$	7,0–5,5	8,0–7,0	8,5–8,0	9,0–8,5
платность тока в замыкающем кольце короткозамкнутого ротора	$J_р$	$А/мм^2$	5,0–4,0	5,5–5,0	6,0–5,5	7,0–6,5
линейная нагрузка обмотки статора	A_1	*А/см*	350–600	250–400	200–300	100–200
коэффициент заполнения паза статора K_1						
для трапециевидных пазов при однослойной обмотке			0,45	0,43	0,40	0,37
для трапециевидных пазов при двухслойной обмотке			0,42	0,40	0,37	0,36
для овальных пазов при однослойной обмотке			0,55	0,50	0,46	0,42
для овальных пазов при двухслойной обмотке			0,45	0,43	0,40	0,37
произведение плотности тока на линейную нагрузку статора (фактор нагрева)	$J_1 \times A_1$	$А^2/(мм^2 \times см.)$	2000		1700	

Примечание. В электродвигателях с алюминиевой обмоткой электромагнитные нагрузки на 10–20% меньше, а коэффициент заполнения паза на 10% больше, чем в электродвигателях с медной обмоткой.

Расчетные формулы.

Индукция в воздушном зазоре, *Т*:

$$B\delta = \frac{2{,}5 \times p \times U_{1Ф} \times a_1 \times 10^2}{l_1 \times Z_1 \times D_1 \times w_{1ЭП} \times k_{10}} \quad (8)$$

где: $U_{1Ф}$ – фазовое напряжение, *в*.

$U_{1Ф} = U_Л$ – при соединении фаз в треугольник (9)
$U_{Ф1} = U_Л/\sqrt{3}$ – при соединении фаз в звезду (10)

$U_Л$ – линейное напряжение, подводимое для питания электродвигателя, *в.*
$w_{1ЭП}$ – число эффективных проводов в пазе.

$$w_{1ЭП} = \frac{6 \times w_{1ЭФ} \times a_1}{Z_1} \quad (11)$$

где: a_1 – число параллельных ветвей в фазе, $w_{1ЭФ}$ – число эффективных (последовательно соединенных) витков в фазе, k_{10} – обмоточный коэффициент. Величина обмоточного коэффициента зависит от числа пазов приходящихся на полюс и фазу q_1 и от укорочения шага обмотки β_1 (табл. 6).
Индукция в зубцах, *Т*:

$$B_{13} = \frac{B\delta \times t_{13} \times l_1}{b_{13} \times l_{1a}} \quad (12)$$

Таблица 6.

Число пазов на полюс и фазу q	Сокращение шага обмотки в долях единицы					
	1,0	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75
	Обмоточный коэффициент k_{10}					
1	1,000	0,997	0,988	0,972	0,951	0,924
2	0,956	0,963	0,954	0,939	0,919	0,893
3	0,960	0,957	0,948	0,933	0,913	0,887
4	0,958	0,955	0,947	0,931	0,911	0,885
5–7	0,957	0,954	0,946	0,930	0,910	0,884
8	0,956	0,953	0,945	0,929	0,909	0,883
9 и более	0,955	0,952	0,944	0,928	0,908	0,882

Число пазов на полюс и фазу q	Сокращение шага обмотки в долях единицы				
	0,70	0,65	0,60	0,55	0,5
	Обмоточный коэффициент k_{10}				
1	0,891	0,853	0,809	0,760	0,700
2	0,861	0,824	0,781	0,734	0,676
3	0,855	0,819	0,779	0,730	0,672
4	0,854	0,817	0,777	0,728	0,671
5–7	0,853	0,816	0,774	0,727	0,670
8	0,852	0,815	0,773	0,727	0,669
9 и более	0,851	0,815	0,773	0,726	0,668

Индукция в спинке, *Т*:

$$B_{1C} = \frac{0,55 \times B\delta \times D_1 \times l_1}{h_{1C} \times l_a \times p} \quad (13)$$

где высота спинки сердечника статора, *см.*:

$$h_{1C} = \frac{D_{1Н} - D_1}{2} - h_{13}$$

(здесь h_{13} – высота зубца статора, *см.*)
Плотность тока, *А/мм*^{2}:

$$J_1 = \frac{I_{1Ф}}{Q_{1ЭФФ} \times a_1} = \frac{I_{1Ф}}{q_{1ЭП} \times m_1 \times a_1} \quad (14)$$

где: $Q_{1ЭФФ}$ – площадь сечения эффективного провода в пазе (витка), *мм*^{2}, $q_{1ЭП}$ – площадь сечения элементарного проводника, *мм*^{2}., m_1 – число элементарных проводников в эффективном проводе паза (в витке), $I_{1Ф}$ – номинальный ток в фазе, *А*.

Ток фазный:

$$I_{1Ф} = \frac{P \times 1000}{\sqrt{3} \times U \times \eta \times \cos\varphi} \quad \text{при соединении фаз в звезду} \quad (15)$$

$$I_{1Ф} = \frac{P \times 1000}{3 \times U \times \eta \times cos\varphi} \quad \text{при соединении фаз в треугольник} \quad (16)$$

P – номинальная мощность электродвигателя (мощность на валу), *квт*, η – коэффициент полезного действия, *cos* φ – коэффициент мощности. Для приближенного определения значений η и *cos*φ, если они не указаны на заводском паспортном щитке можно пользоваться следующими данными: для электродвигателей защищенного исполнения с короткозамкнутым ротором – таблица 7, для обдуваемых электродвигателей с короткозамкнутым ротором – таблица 8, для электродвигателей защищенного исполнения с фазовым ротором – таблица 9, для взрывозащищенных электродвигателей – таблица 10.

Линейная нагрузка, $A/см.$:

$$A_1 = \frac{I_{1Ф} \times Z_1 \times w_{1ЭП}}{\pi \times D_1 \times a_1} \quad (17)$$

Произведение $J_1 \times A_1$ – один из факторов, определяющих нагрев электродвигателя. Его допустимое значение приведено в таблице 5.

Коэффициент заполнения паза. Некоторые авторы определяют коэффициент заполнения паза как отношение площади сечения всех неизолированных проводов заложенных в паз ко всей площади паза. Другие авторы рассчитывают его как отношение площади сечении всех изолированных проводов, заложенных в паз к свободному сечению паза (т. е. к площади паза, за вычетом площадей, занимаемых клином, межслоевой прокладкой и пазовой изоляцией).

Коэффициент заполнения паза определяется так же, как отношение площади сечения всех изолированных проводов заложенных в паз к площади паза. Последний метод менее точен, чем два других, но более прост и практичен. Нами принят последний метод при котором:

$$K_1 = \frac{n_1 \times q_{1ЭП}}{Q_{1П}} = \frac{w_{1ЭП} \times m_1 \times q_{1ЭП}}{Q_{1П}} \quad (18)$$

где: n_1 – общее число проводников заложенных в паз, $q_{1ЭП}$ – сечение изолированного элементарного проводника, $мм^2$.

Таблица 7. η и *cos*φ для электродвигателей защищенного исполнения с короткозамкнутым ротором.

Мощность *квт*	Частота вращения (синхронная) *об. мин.*							
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
	η				*cos*φ			
0,6	–	74,0	–	–	–	0,76	–	–
1,0	79,0	78,5	77,0	–	0,86	0,79	0,72	–
1,7	81,5	81,5	79,5	–	0,87	0,82	0,75	–
2,8	84,0	83,5	82,5	–	0,88	0,84	0,78	–
4,5	85,5	85,5	84,5	83,5	0,88	0,85	0,85	0,80
7,0	87,0	87,0	86,0	85,0	0,89	0,86	0,81	0,78
10	87,5	87,5	86,5	85,0	0,89	0,88	0,82	0,80
14	87,5	88,5	87,0	87,0	0,89	0,88	0,83	0,81
20	88,5	89,0	88,0	88,0	0,90	0,88	0,84	0,82
28	89,0	90,0	89,0	89,0	0,90	0,88	0,85	0,83
10	90,0	90,5	90,0	90,0	0,91	0,89	0,86	0,84
55	90,5	91,0	91,0	91,0	0,91	0,89	0,87	0,84
75	91,0	91,5	92,0	–	0,91	0,89	0,88	–
100	91,5	92,0	–	–	0,92	0,89	–	–

Таблица 8. η и *cos*φ для обдуваемых электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

Мощность *квт*	Частота вращения (синхронная) *об. мин.*							
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
	η				*cos*φ			
0,6	76,0	74,0	–	–	0,85	0,76	–	–
1,0	79,0	78,5	77,0	–	0,86	0,79	0,72	–
1,7	81,5	61,5	79,5	–	0,87	0,82	0,70	–
2,8	84,0	83,5	82,5	–	0,88	0,84	0,78	–
4,5	85,5	85 5	84,5	84,5	0,86	0,85	0,80	0,76
7,0	87,5	87,0	86,0	86,0	0,89	0,86	0,81	0,78
10	87,5	87 5	87,0	87,0	0,89	0,88	0,82	0,80
14	88,0	88t5	88,0	87,5	0,90	0,88	0,83	0,81
20	88,5	89,0	88,5	88,0	0,90	0,88	0,84	0 82
28	89,5	90,0	89,0	89,0	0,91	0,88	0,86	0,83
40	89,5	90,5	90,0	90,0	0,91	0,89	¦0,87	0,84
55	90,0	91,0	91,0	91,0	0,92	0,89	0,88	0,84
75	90,5	91,5	92,0	–	0,92	0,90	0,89	–
100	91,0	92,0	–	–	0,92	0,90	–	–

Таблица 9. η и $cos\varphi$ для электродвигателей защищенного исполнения с фазным ротором.

Мощность *квт*	Частота вращения (синхронная) *об. мин.*							
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
	η				$cos\varphi$			
1,7	–	72,5	–	–	0,72	–	–	72,5
2,8	78,0	75,5	–	0,82	0,74	–	78,0	75,5
4,5	80,0	78 5	76,5	0,83	0,76	0,72	80,0	78,5
7,0	82,0	81,0	79,5	0,84	0,78	0,74	82,0	81,0
10	83,5	82,5	81,5	0,85	0,79	0,76	83,5	82,5
14	84,5	84,0	83,0	0,86	0,80	0,77	84,5	84,0
20	86,0	85,0	84,5	0,80	0,81	0,79	86,0	85,0
28	87,0	86,5	86,0	0,87	0,82	0,80	87,0	86,5
40	88,0	87,5	87,5	0,87	0,83	0,81	88,0	87,5
55	89,0	88,5	88,5	0,87	0,83	0,82	89,0	88,5
75	90,0	89,5	–	0,88	0,84	–	90,0	89,5
100	90,5	–	–	0,88	–	–	90,5	

Таблица 10. η и $cos\varphi$ для взрывозащищенных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

Мощность *квт*	Частота вращения (синхронная) *об. мин.*							
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
	η				$cos\varphi$			
1,7	–	72,5	–	–	0,72	–	–	72,5
2,8	78,0	75,5	–	0,82	0,74	–	78,0	75,5
4,5	80,0	78,5	76,5	0,83	0,76	0,72	80,0	78,5
7,0	82,0	81,0	79,5	0,84	0,78	0,74	82,0	81,0
10	83,5	82,5	81,5	0,85	0,79	0,76	83,5	82,5
14	84,5	84,0	83,0	0,86	0,80	0,77	84,5	84,0
20	86,0	85,0	84,5	086	0,81	0,79	86,0	85,0
28	87,0	86,5	86,0	0,87	0,82	0,80	87,0	86,5
40	88,0	87,5	87,5	0,37	0,83	0,81	88,0	87,5
55	89,0	88,5	88,5	0,87	0,83	0,82	89,0	88,5
75	90,0	89,5	–	0,88	0,84	–	90,0	89,5
100	90,5	–	–	0 88	–	–	90,5	–

Электродвигатели с короткозамкнутым ротором из–за неправильного соотношения числа пазов статора, ротора и полюсов могут не запускаться при подключении к сети, или начав вращаться застревать на некоторой скорости, обычно составляющей ½ от номинальной, или при вращении издавать характерный гул. Чтобы всего этого не произошло, надо выдерживать следующие соотношения между числами пазов статора, ротора и полюсов:

$$\begin{array}{ll} Z_2 \neq Z_1 & Z_2 \neq Z_1 \pm 2p \\ Z_2 \neq 0{,}5 \times Z_1 & Z_2 \neq 0{,}5 \times Z_1 \pm p \\ Z_2 \neq 2 \times Z_1 & Z_2 \neq 2 \times Z_1 \pm 2p \\ Z_2 \neq 6 \times p \times k & Z_2 \neq 6 \times p \times k \pm 1 \\ Z_2 \neq Z_1 \pm p & Z_2 \neq 6 \times p \times k \pm (2p \pm 1) \end{array} \qquad (19)$$

где k – любое целое число от 1 до 4.

Пример расчета.

Требуется произвести поверочный расчет электродвигателя с короткозамкнутым ротором. Паспортные данные электродвигателя, данные измерений и обмоточные данные:

Мощность P = 4,5 *квт*. Напряжение U = 220/380 *в*. Ток I = 16,2/9,4 *А*.
Коэффициент полезного действия η = 85,5%. Коэффициент мощности $cos\varphi$ = 0,85.
Частота вращения (синхронная) $n_С$ = 1500 *об. мин*.
Наружный диаметр сердечника статора $D_{1Н}$ = 24,5 *см*.
Внутренний диаметр сердечника статора D_1 = 15,2 *см*.
Полная длина сердечника статора l = 9,0 *см*.
Высота спинки сердечника статора $h_{1С}$ = 2,45 *см*.
Число радиальных вентиляционных каналов сердечника статора n = 1
Ширина радиального канала сердечника статора $b_К$ = 1,0 *см*.
Ширина зубца статора в самом узком месте b'_{13} = 0,6 *см*.
Ширина зубца статора в самом широком месте b''_{13} = 0,9 *см*.
Толщина листов стали сердечника статора 0,5 *мм*., межлистовая изоляция – лак, k = 0,93
Число пазов статора Z_1 = 36. Площадь паза статора $Q_{1П}$ = 206,5 $мм^2$.
Тип обмотки статора однослойная с концентрическими катушками.
Число эффективных проводов в пазу статора $w_{1ЭП}$ = 32.
Число элементарных проводников в эффективном проводе обмотки статора m_1 = 1.
Число параллельных ветвей в фазе обмотки статора a_1 = 1.
Марка провода обмотки статора ПЭЛБО.
Диаметр неизолированного элементарного проводника d_1 = 1,62 *мм*.
Диаметр изолированного проводника $d_{1ИЗ}$ = 1,83 *мм*. Число пазов ротора Z_2 = 26.
Сечение не изолированного элементарного проводника q_1 = 2,06 $мм^2$.
Сечение изолированного элементарного проводника $q_{1И}$ = 2,62 $мм^2$.
Исполнение электродвигателя защищенное.

Расчет.

Число полюсов электродвигателя (по формуле 1):

$$2p = \frac{6000}{1500} = 4$$

Полюсное деление статора (по формуле 4):

$$\tau_1 = \frac{3,14 \times 15,2}{4} = 11,95 \text{ см.}$$

Зубцовый шаг статора (по формуле 5):

$$t_{13} = \frac{3,14 \times 15,2}{36} = 1,32 \text{ см.}$$

Активная длина сердечника статора (по формуле 6):

$$l_{1С} = (9,0 - 1 \times 10) \times 0,93 = 7,44 \text{ см.}$$

Расчетная ширина зубца статора (по формуле 7):

$$b_{13} = \frac{2 \times 0,6}{3} + \frac{0,9}{3} = 0,7 \text{ см.}$$

Число пазов на полюс и фазу обмотки статора:

$$q_1 = \frac{36}{6 \times 2} = 3$$

Обмоточный коэффициент (согласно табл. 6): k_{10} = 0,96

Индукция в воздушном зазоре (по формуле 8):

$$B\delta = \frac{2,5 \times 2 \times 220 \times 1 \times 10^2}{9,0 \times 36 \times 15,2 \times 32 \times 0,96} = 0,73\ T$$

Индукция в зубцах статора (по формуле 12):

$$B_{13} = \frac{0,73 \times 1,32 \times 9,0}{0,7 \times 7,44} = 1,66\ T$$

Индукция в спинке статора (по формуле 13):

$$B_{1C} = \frac{0,55 \times 0,73 \times 15,2 \times 9,0}{2,45 \times 7,44 \times 2} = 1,51\ T$$

Плотность тока (по формуле 14):

$$J_1 = \frac{9,4}{2,06 \times 1 \times 1} = 4,56\ A/\text{мм}^2$$

Линейная нагрузка (по формуле 17):

$$A_1 = \frac{9,4 \times 36 \times 32}{3,14 \times 15,2 \times 1} = 227\ A/\text{см.}$$

Произведение $J_1 \times A_1$ = 1040 $A^2/мм^2 \times см$.

Коэффициент заполнения паза статора (по формуле 18):

$$K_1 = \frac{32 \times 2,62}{206,5} = 0,405$$

Соотношению между числами пазов статора, ротора и полюсов (по формулам 19):

$Z_2 \neq Z_1$	26 ≠ 36
$Z_2 \neq 0,5 \times Z_1$	26 ≠ 18
$Z_2 \neq 2 \times Z_1$	26 ≠ 72
$Z_2 \neq 6 \times p \times k$	26 ≠ 12, 24, 36, 48
$Z_2 \neq Z_1 \pm p$	26 ≠ 34 и 38
$Z_2 \neq Z_1 \pm 2p$	26 ≠ 32, 40
$Z_2 \neq 0,5 \times Z_1 \pm p$	26 ≠ 16 и 20
$Z_2 \neq 2 \times Z_1 \pm 2p$	26 ≠ 76
$Z_2 \neq 6 \times p \times k \pm 1$	26 ≠ 11, 13, 23, 25, 35, 37, 47, 49
$Z_2 \neq 6 \times p \times k \pm (2p \pm 1)$	26 ≠ 7, 9, 15, 17, 19, 21, 27, 29, 31, 33, 39, 41, 43, 45, 45, 51, 53,

Мощность электродвигателя (формула 15):

$$P = \sqrt{3} \times I_{1\Phi} \times U_{1\Phi} \times \eta \times cos\varphi = \frac{1{,}73 \times 9{,}4 \times 380 \times 0{,}85 \times 0{,}855}{1000} = 4{,}5 \text{ квт}$$

Значения η и $cos\varphi$ указанные в паспортных данных совпадают с соответствующими значениями таблицы 7. Результаты расчета указывают, что электромагнитные нагрузки электродвигателя и коэффициент заполнения паза статора находятся в допустимых пределах указанных в таблице 5. Также соблюдены требуемые соотношения между числами пазов и полюсов. Таким образом подтверждаются данные электродвигателя указанные на его паспортном щитке.

Поверочный расчет ротора электродвигателя с фазовой обмоткой.

Исходные данные.

Для ротора, как и для статора, на основании обмоточных данных и снятых с натуры размеров определяют необходимые значения для расчета.
Зубцовый шаг:

$$t_{31} = \frac{\pi \times D_{2\text{Н}}}{Z_2} \quad (20)$$

где $D_{2\text{Н}}$ – наружный диаметр ротора, *см.*, Z_2 – число пазов ротора.
Активная длина сердечника стали ротора:

$$l_{2a} = k \times (l_2 - n_{2\text{К}} \times b_{2\text{К}}) \quad (21)$$

где l_2 – полная длина сердечника стали ротора (включая радиальные вентиляционные каналы), *см.*, $n_{2\text{К}}$ – число вентиляционных каналов, $b_{2\text{К}}$ – ширина вентиляционных каналов, k – коэффициент заполнения пакета сталью (табл. 4).
Площадь паза:

$$Q_{2\text{П}},\ см^2.$$

Наиболее распространенными являются пазы с параллельными боковыми стенками. Определение их площади не представляет труда.
Расчетная ширина зубца:

$$b_{23} = \frac{2 \times b'_{23}}{3} + \frac{b''_{23}}{3} \quad (22)$$

где b'_{23} –ширина зубца в его самом широком месте, *см.*; b''_{23} – ширина зубца в его самом узком месте, *см*. Расчетные формулы. Индукция в зубцах ротора:

$$B_{23} = \frac{B\delta \times t_{23} \times l_{23}}{b_{23} \times l_{2a}} \quad (23)$$

Индукция в спинке ротора:

$$B_{2\text{С}} = \frac{0{,}55 \times B\delta \times D_{2\text{Н}}}{h_{2\text{С}} \times p} \quad (24)$$

высота спинки сердечника ротора:

$$h_{2\text{С}} = \frac{D_{2\text{Н}} - D_2}{2} - h_{23} \text{ см.}$$

где: h_{23} – высота зубца ротора, *см.*, $D_{2\text{Н}}$ – наружный диаметр ротора, *см.*, D_2 – внутренний диаметр ротора, *см.*

У электродвигателей малой мощности сердечник стали ротора насажен непосредственно на вал, т. е. внутренний диаметр ротора равен диаметру вала. Если у ротора в месте посадки на вал сделаны вентиляционные каналы (рис. 20), то при расчетах за внутренний диаметр ротора принимают диаметр окружности описанный вокруг этих каналов.
Фазовое напряжение, *в*:

$$U_{2Ф} = \frac{U_{1Ф} \times w_{2ЭП} \times k_{20} \times a_1}{w_{1ЭП} \times Z_1 \times k_{10} \times a_2} \quad (25)$$

где $w_{2ЭП}$ – число эффективных проводов в пазу ротора:

$$w_{2ЭП} = \frac{6 \times w_{2ЭФ} \times a_2}{Z_2} \quad (26)$$

здесь $w_{2ЭФ}$ – общее число витков в фазе обмотки ротора, a_2 – число параллельных ветвей в фазе, k_{20} – обмоточный коэффициент (табл. 6).
Фазные роторы современных электродвигателей выполняют с волновой обмоткой, с двумя эффективными проводами в пазу – стержнями прямоугольного сечения, т. е. $w_{2ЭП} = 2$.

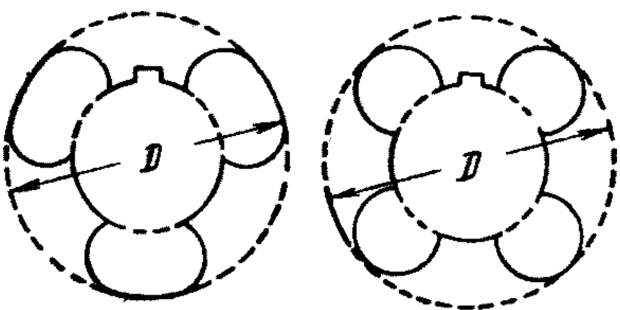


Рис. 20. Фигурные вентиляционные каналы в сердечнике ротора.

Петлевые обмотки роторов состоящие из концентрических или цепных многовитковых катушек круглого провода применялись в электродвигателях старых выпусков, роторы с такой обмоткой практически в ремонт теперь не поступают.

Напряжение между кольцами, *в*:
при соединении фаз в треугольник:

$$U_2 = U_{2Ф} \quad (27)$$

при соединении фаз в звезду:

$$U_2 = \sqrt{3} \times U_{2Ф} \quad (28)$$

Напряжение между кольцами ротора не нормируется, но величина напряжения определяет уровень изоляции узла контактных колец. В электродвигателях мощностью до 15 *квт* напряжение между кольцами находится в пределах 200 – 250 *в*, в электродвигателях до 50 *квт* – в пределах 330 *в*, в крупных электродвигателях достигает 1000 *в* и более.
Для снижения напряжения между кольцами фазы обмотки соединяются в треугольник или обмотку выполняют двумя параллельными ветвями. Величина тока снимаемого с контактных колец при этом увеличивается, поэтому, если напряжение между кольцами не превышает указанных величин предпочтительно соединить фазы в звезду.

Ток ротора фазный, A:

$$I_{2\Phi} = \frac{0{,}9 \times I_{1\Phi} \times Z_1 \times w_{1ЭП} \times k_{10} \times a_2}{Z_2 \times w_{2ЭП} \times k_{20} \times a_1} \quad (29)$$

где: $I_{1\Phi}$ – фазный ток статора, A.
Плотность тока, $A/мм^2$:

$$J_2 = \frac{I_{2\Phi}}{Q_{2ЭП} \times a_2} = \frac{I_{2\Phi}}{q_2 \times m_2 \times a_2} \quad (30)$$

где $Q_{2ЭП}$ – площадь сечения эффективного провода в пазу (витка), $мм^2$, q_2 – площадь сечения элементарного проводника, $мм^2$., m_2 – число элементарных проводников в эффективном проводе паза.

$$A_2 = \frac{I_{2\Phi} \times Z_2 \times w_{2ЭП}}{\pi \times D_{2Н} \times a_2} \quad (31)$$

Коэффициент заполнения паза ротора, как и для статора, определяется отношением площади сечения всех изолированных проводов заложенных в паз к площади паза. Если у волновой обмотки в пазу два стержня этот коэффициент не нормируется, его определяют в каждом отдельном случае исходя из конкретных размеров паза, стержня и изоляции.

Поверочный расчет короткозамкнутого ротора электродвигателя.

В электродвигателях с короткозамкнутым ротором обмотку последнего, так называемую беличью клетку, получают путем заливки пазов алюминиевым сплавом (в основном алюминиево–марганцовым) с повышенным удельным сопротивлением. Как одно целое отливаются стержни, короткозамыкающие кольца и если это предусмотрено конструкцией электродвигателя, вентиляционные лопатки. При ремонте такую обмотку частично или полностью восстанавливают по заводскому исполнению и нет надобности в ее электрическом или механическом расчете. Следует только сохранить химический состав сплава, чтобы сохранить активное сопротивление обмотки, пусковой момент электродвигателя и величину скольжения при номинальной нагрузке. У электродвигателей средней и большой мощности беличьи клетки могут быть не литые алюминиевые, а сварные из меди или латуни (в этой конструкции стержни заложенные в пазы приварены к короткозамыкающим кольцам расположенным по торцам ротора). При поверочном расчете короткозамкнутого ротора с любой клеткой следует по формулам (23) и (24) определить индукцию в зубцах и спинке ротора и сравнить их с допустимыми указанными в таблице 5.

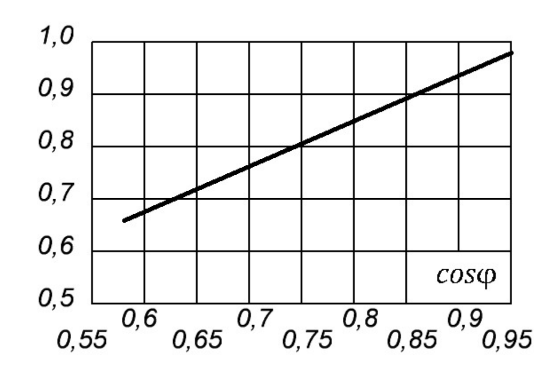


Рис. 21. Зависимость коэффициента K от $cos\varphi$.

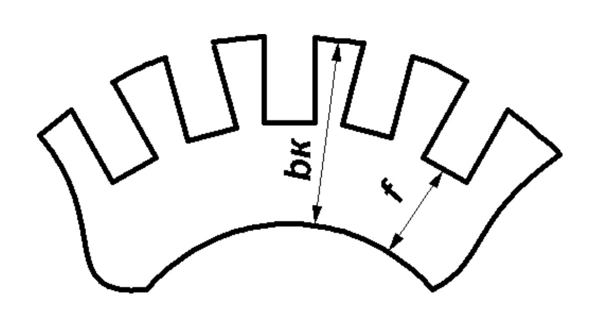


Рис. 22. Короткозамыкающее кольцо с пазами для стержней.

Для сварных клеток также определяют следующие параметры.
Ток в стержне обмотки (беличьей клетке), *A*:

$$I_C = \frac{K \times I_{2\text{Ф}} \times 6 \times w_{2\text{ЭП}} \times k_{2\text{О}}}{Z_2} \quad (32)$$

где K – коэффициент зависящий от $cos\varphi$ электродвигателя (определяется по кривой, рис. 21).
Ток в короткозамыкающем торцевом кольце, *A*:

$$I_\text{К} = \frac{I_\text{С}}{2 \times sin\frac{\beta}{2}} \quad (33)$$

где β – угол сдвига токов в соседних стержнях, *рад.*:

$$\beta = \frac{2 \times \pi \times p}{Z_2} \quad (34)$$

Плотность тока в стержнях и замыкающем кольце также сравнивают с допустимыми величинами по таблице 5. Кроме того, нужно проверить величину механического напряжения от растяжения возникающего при вращении ротора в короткозамыкающем кольце под действием центробежных сил и веса кольца.
Для массивных колец не ослабленных пазами под стержни, *кгс/см*^{2}:

$$\sigma = 2{,}8 \times D_\text{К} \times n_\text{С} \times \varphi \times 10^{-8} \quad (35)$$

где $D_\text{К}$ – средний диаметр кольца, *см.*, φ – удельный вес материала кольца, *г/см*^{3}.
Для колец с пазами под стержни (рис. 22), *кгс/см*^{2};

$$\sigma_1 = \frac{\sigma \times b_\text{К}}{f} \quad (36)$$

где $b_\text{К}$ – радиальная толщина кольца, *см.*, f – высота мостика, *см.*

Расчет при изменении напряжения.

Исходные данные.

Переводя электродвигатель на новое напряжение при той же частоте вращения надо сохранить его мощность, а для этого следует оставить неизменными индукцию на всех участках магнитной цепи и объем тока в пазу.
Из формулы (8) при неизменной индукции в зазоре следует:

$$\frac{U_{1\text{ФС}} \times a_{1\text{С}}}{w_{1\text{ЭПС}} \times k_{1\text{ОС}}} = \frac{U_{1\text{ФН}} \times a_{1\text{Н}}}{w_{1\text{ЭПН}} \times k_{1\text{ОН}}} \quad (37)$$

При сохранности типа и шага обмотки:

$$w_{1\text{ЭПН}} = \frac{w_{1\text{ЭПС}} \times U_{1\text{ФН}}}{U_{1\text{ФС}}} \quad (38)$$

Из формул (15) и (16) получим при сохранении плотности тока:

$$\frac{I_{1\text{ФН}}}{I_{1\text{ФС}}} = \frac{U_{1\text{ФН}}}{U_{1\text{ФС}}} = \frac{Q_{1\text{ЭПН}}}{Q_{1\text{ЭПС}}} \quad (39)$$

или

$$Q_{1\text{ЭПН}} = \frac{Q_{1\text{ЭПС}} \times U_{1\text{ФС}}}{U_{1\text{ФН}}} \quad (40)$$

Таким образом, при сохранении скорости вращения, плотности тока и мощности число эффективных проводов в пазу изменяется прямо пропорционально, а их сечение – обратно пропорционально новому и старому напряжению.

Если число проводов в пазу увеличивается, увеличится и объем занимаемый изоляцией проводов, поэтому рекомендуется применять элементарные проводники большего диаметра входящие в эффективный провод или обмоточные провода с более тонкой изоляцией. Иногда приходится прибегать к уменьшению числа параллельных ветвей в фазе и тем самым увеличивать сечение провода в каждой из параллельных ветвей. Однако упомянутые мероприятия по увеличению коэффициента заполнения паза не всегда можно осуществить или эффект их может оказаться недостаточным. Кроме того, переход на более высокое напряжение может быть связан с утолщением пазовой изоляции, поэтому не всегда удается сохранить общее сечение меди в пазу, что вынуждает снизить мощность электродвигателя. При переводе крупных электродвигателей с номинального напряжения 3 *кв* на 6 *кв* критическая потеря мощности достигает 15 – 20%.

Перевод электродвигателей на пониженное напряжение во многих случаях позволяет увеличить их мощность благодаря облегчению пазовой изоляции и уменьшению числа эффективных проводов в пазу. При переводе электродвигателя на новое напряжение обмотка ротора не нуждается в изменении, как следует из формул (25) и (29) напряжение на кольцах ротора и фазный ток при этом остаются прежними.

Здесь к обозначениям, относящимся к старому исполнению, добавляется индекс "с" к новому исполнению – индекс "н". Эти индексы следует добавлять при последующих расчетах.

Пример расчета.

Требуется рассчитать обмотки электродвигателя напряжением 127/220 *в* при изменении напряжения на 220/380 *в*.

Обмоточные данные электродвигателя (127/220 *в*)

Мощность, Pс = 8,0 *квт*. Напряжение, Uс = 127/220 *в*.
Число эффективных проводов в пазе обмотки статора $w_{1\text{ЭПС}}$ = 20.
Число элементарных проводников в эффективном проводе $m_{1\text{С}}$ = 2.
Число параллельных ветвей в фазе обмотки $a_{1\text{С}}$ = 1. Марка провода ПЭЛБО.
Диаметр неизолированного элементарного проводника $d_{1\text{С}}$ = 1,3 *мм*.
Диаметр изолированного элементарного проводника $d_{1\text{ИС}}$ = 1,51 *мм*.
Сечение неизолированного элементарного проводника $q_{1\text{С}}$ = 1,327 *мм*^{2}
Сечение изолированного элементарного проводника $q_{1\text{ИС}}$ = 1,791 *мм*^{2}.
Тип обмотки однослойная. Площадь паза, *мм*^{2} $Q_{1\text{П}}$ = 160. Форма паза овальная.

Расчет.

Число эффективных проводов в пазу при изменении напряжения на 220/380 *в* (с условием сохранения схемы обмотки и числа элементарных проводников в эффективном проводе – по формуле 38):

$$w_{1\text{ЭПН}} = \frac{w_{1\text{ЭПС}} \times U_{1\text{Н}}}{U_{1\text{С}}} = \frac{20 \times 220}{127} = 34{,}6$$

округляется до ближайшего целого числа 35.
Сечение не изолированного элементарного проводчика (по формуле 40):

$$q_{1\text{П}} = \frac{q_{1\text{С}} \times U_{1\text{С}}}{U_{1\text{Н}}} = \frac{1{,}327 \times 127}{220} = 0{,}77 \text{ мм}^2$$

Диаметр неизолированного элементарного проводника:

$$d_{1\text{Н}} = 1{,}13 \times \sqrt{0{,}77} = 0{,}99 \text{ мм}.$$

округляется до ближайшего стандартного размера 1 *мм*. Диаметр изолированного элементарного проводника при сохранении марки провода ПЭЛБО и двухсторонней толщине изоляции 0,21 *мм*., $d_{1\text{ИН}}$ = 1 + 0,21 = 1,21 *мм*.
Сечение изолированного элементарного проводника:

$$q_{1\text{ИН}} = \frac{\pi \times d_{1\text{ИН}}^2}{4} = \frac{3{,}14 \times 1{,}21^2}{4} = 1{,}15 \text{ мм}^2$$

Указанное уменьшение диаметра провода, при одновременном увеличении числа проводов укладываемых в паз, ухудшает коэффициент заполнения паза. По формуле (18):

$$K_{1C} = \frac{w_{1\text{ЭПС}} \times m_{1\text{С}} \times q_{1\text{ИС}}}{Q_{1\text{П}}} = \frac{20 \times 2 \times 1{,}791}{160} = 0{,}45$$

$$K_{1\text{Н}} = \frac{35 \times 2 \times 1{,}15}{160} = 0{,}5$$

Столь значительное повышение коэффициента заполнения паза недопустимо, так как может привести к повреждению изоляции при укладке обмотки, поэтому необходимо либо выбрать провод другой марки с более тонкой изоляцией, либо применить для изоляции паза более тонкие материалы с повышенной электрической прочностью. Если это невозможно, рационально изменить обмоточные данные: выполнить обмотку с одной ветвью в фазе вместо двух, без разбивки эффективного провода на элементарные проводники. При этом перерасчете сечение не изолированного элементарного проводника (который является также эффективным проводом): $q_{1\text{Н}}$ = 0,77 × 2 = 1,54 *мм*². Диаметр не изолированного элементарного проводника $d_{1\text{Н}} = 1{,}13 \times \sqrt{1{,}54} = 1{,}4$ *мм*. Диаметр изолированного элементарного проводника при марке провода ПЭЛБО с двухсторонней толщиной изоляции 0,21 *мм*. $d_{1\text{ИН}}$ = 1,4 + 0,21 = 1,61 *мм*.
Сечение изолированного элементарного проводника:

$$q_{1\text{ИН}} = \frac{\pi \times d_{1\text{ИН}}^2}{4} = \frac{3{,}14 \times 1{,}61^2}{4} = 2{,}036 \text{ мм}^2$$

коэффициент заполнения паза:

$$K_{1\text{Н}} = \frac{35 \times 2{,}036}{160} = 0{,}445$$

– совпадает с его значением до перевода электродвигателя на напряжение 220/380 *в*.

Расчет при изменении частоты вращения.

Общие сведения.

Переводя на другую частоту вращения электродвигатель с короткозамкнутым ротором следует сверить по формуле (19) возможность такого изменения, допустимость соотношения нового измененного числа полюсов и числа пазов статора и ротора. При уменьшении числа полюсов и сохранении индукции в воздушном зазоре увеличивается индукция в спинке сердечников статора и ротора. При увеличении числа полюсов зависимость будет обратная. Индукции же в зубцах сердечников статора и ротора остаются неизменными.

Пересчет электродвигателя в связи с изменением числа полюсов следует начинать с определения индукции на всех участках магнитной цепи. В некоторых случаях может оказаться, что спинки сердечников статора и ротора недостаточно загружены магнитным потоком и индукция в них может быть повышена. Такая недогрузка бывает у электродвигателей старых выпусков, в них активные материалы не всегда были загружены полностью.

Когда при измененном числе полюсов индукция в зазоре и зубцах охраняется и когда возросшая индукция в спинке не окажется чрезмерной (превышение приведенных в таблице 5 значений не более чем на 16–15%) при пересчете руководствуются следующими рекомендациями. При сохранении индукции в зазоре и поминального фазовою напряжения (см. формулу 8):

$$\frac{p_{\text{С}} \times a_{1\text{С}}}{w_{1\text{эпС}} \times k_{10\text{С}}} = \frac{p_{\text{Н}} \times a_{1\text{Н}}}{w_{1\text{эпН}} \times k_{10\text{Н}}}$$

т. е. новое число эффективных проводов в пазу:

$$w_{\text{эп1Н}} = \frac{w_{1\text{эпС}} \times k_{10\text{С}} \times a_{1\text{Н}} \times p_{\text{Н}}}{k_{10\text{Н}} \times a_{1\text{С}} \times p_{\text{С}}} = \frac{w_{1\text{эпС}} \times k_{10\text{С}} \times n_{\text{СС}} \times a_{1\text{Н}}}{k_{10\text{Н}} \times n_{\text{СН}} \times a_{1\text{С}}}$$

Если сохраняется тип, шаг обмотки и объем тока в пазу, сечение эффективного провода и число проводов в пазу соответственно составит:

$$Q_{1\text{эпН}} = \frac{Q_{1\text{эпС}} \times p_{\text{С}}}{p_{\text{Н}}} = \frac{Q_{1\text{эпС}} \times n_{\text{СН}}}{n_{\text{СС}}} \quad (41)$$

$$w_{1\text{эпН}} = \frac{w_{1\text{эпС}} \times p_{\text{Н}}}{p_{\text{С}}} = \frac{w_{1\text{эпС}} \times n_{\text{СС}}}{n_{\text{СН}}} \quad (42)$$

Номинальная мощность электродвигателя:

$$P_{\text{Н}} = \frac{P_{\text{С}} \times p_{\text{С}}}{p_{\text{Н}}} = \frac{P_{\text{С}} \times n_{\text{СН}}}{n_{\text{СС}}} \quad (43)$$

Указанное в формуле (43) изменение мощности электродвигателя при изменении частоты вращения можно рассматривать как приближенное, так как при увеличении частоты вращения увеличиваются потери на трение, хотя и повышается производительность вентилятора.

Когда при увеличении частоты вращения приходиться уменьшать индукцию в зазоре чтобы ввести в норму индукции в спинках сердечников статора и ротора, пропорционально увеличивается число эффективных проводов в пазе и уменьшается сечение эффективного провода и номинальная мощность электродвигателя.
Если число эффективных проводов в пазе увеличить, ухудшится коэффициент заполнения паза. Поэтому при перемотке электродвигателя следует применять провода с более тонкой изоляцией и максимально допустимого диаметра (из условия возможности укладки провода через шлиц паза). Для увеличения диаметра провода следует пересмотреть и по возможности уменьшить число элементарных проводников в эффективном проводе и число параллельных ветвей в фазе.
Увеличение мощности электродвигателя при повышении частоты вращения может ограничиваться механической прочностью его частей и их нагревом.
Окружная скорость ротора:

$$\upsilon_{\text{Р}} = \frac{\pi \times D_{2\text{Н}} \times n}{60 \times 100} \quad (44)$$

Она не должна превышать для фазового ротора 30–40 *м/с.*, а для короткозамкнутого ротора 40–60 *м/с*. Бандаж фазового ротора при увеличении скорости вращения обычно усиливают. Требуемое число витков бандажа:

$$w = \frac{1{,}63 \times 10^{-6} \times Q \times D_{\text{С}} \times n^2}{d \times (R_Z - \sigma)} \quad (45)$$

где Q – вес лобовой части обмотки с изоляцией, *кг.*, $D_{\text{С}}$ – средний диаметр обмотки в лобовых частях, *см.*, n – номинальная частота вращения ротора, *об. мин.*, R_{Z} – допускаемое напряжение растяжения в бандаже, равное 3000 – 3500 *кгс/см*^{2}.
d – диаметр проволоки бандажа, находящийся в зависимости от диаметра ротора:

диаметр ротора, *см.*	10 – 20	21 – 40	41 – 60	61 – 100	более 100
диаметр проволоки, *мм.*	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0

σ – напряжение в бандаже возникающее от его веса при вращении:

$$\sigma = 0{,}3 \times 10^{-6} \times D_{\text{Б}}^2 \times n^2 \ \ \text{кгс/см}^2$$

где $D_{\text{Б}}$ – диаметр бандажа.

Если проволоки требуемого диаметра нет, то ее заменяют проволокой другого диаметра, число витков в равнопрочном бандаже при этом:

$$w = \frac{w_{\text{ТР}} \times d_{\text{ТР}}^2}{d^2} \quad (46)$$

где $w_{\text{ТР}}$ – число витков бандажа, требуемое по расчету, w – то же, при замене проволоки, $d_{\text{ТР}}$ – диаметр проволоки требуемый по расчету, *мм.*, d – диаметр заменяющей бандажной проволоки, *мм.*

По схеме (рис. 23) следует проверить прочность свободного конца вала (т. е. конца вала служащего для насадки шкива, муфты или шестерни).

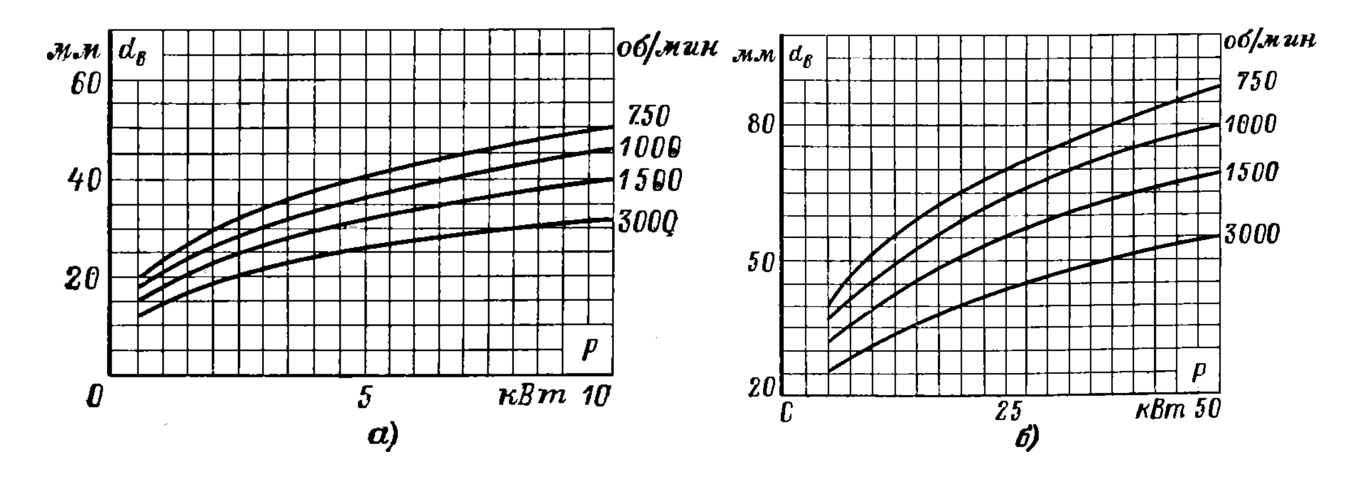


Рис. 23. Максимально допустимый диаметр вала
в зависимости от мощности электродвигателя.

Нагрев подшипников также увеличивается при повышении скорости вращения и увеличении мощности электродвигателя, что отрицательно сказывается на общем коэффициенте полезного действия электродвигателя.

При перемотках связанных с уменьшением числа полюсов увеличивается шаг обмотки и вылет лобовых частей. Здесь следует проверить, допустимо ли это с точки зрения обеспечения требуемого изоляционного расстояния между торцевыми крышками и обмоткой.

Пример расчета.

Требуется рассчитать обмотку электродвигателя при изменении частоты вращения с 1500 на 3000 *об. мин*. Паспортные и обмоточные данные электродвигателя (частота вращения 1500 *об. мин.*):

Мощность $P_С$ = 4,5 *квт*. Напряжение $U_С$ = 220/380 *в*. Ток $I_С$ = 16,3/9,4 *А*
Частота вращения, $n_{СС}$ = 1500 *об. мин*.
Внутренний диаметр сердечника статора D_1 = 15,20 *см*.
Наружный диаметр сердечника ротора $D_{2Н}$ = 15,12 *см*.
Полная длина сердечника статора l_1 = 12,0 *см*.
Полная длина сердечника ротора l_2 = 12,0 *см*.
Высота спинки статора, $h_{1С}$ = 2,5 *см*. Высота спинки ротора $h_{2С}$ = 3,0 *см*.
Число радиальных вентиляционных каналов статора $n_К$ = 2.
Ширина радиального канала статора $b_{1К}$ = 1,0 *см*.
Ширина зубца статора (расчетная) b_{13} = 0,7 *см*.
Коэффициент заполнения сердечника из стали 0,5 *мм*.,
межлистовая изоляция лак, k = 0,93
Число пазов статора Z_1 = 36. Число пазов ротора Z_2 = 26.
Площадь паза статора $Q_{1П}$ = 230 *мм*^{2}. Тип обмотки статора двухслойная.
Марка провода обмотки статора ПЭЛБО.
Число эффективных проводников в пазу статора $w_{эп1С}$ = 32.
Число элементарных проводников в эффективном проводе обмотки статора $m_{1С}$ = 2.
Число параллельных ветвей в обмотке статора $a_{1С}$ = 1.
Диаметр не изолированного элементарного проводника обмотки статора $d_{1С}$ = 1,16 *мм*.
Диаметр изолированного элементарного проводника обмотки статора $d_{И1С}$ = 1,37 *мм*.
Стечение не изолированного элементарного проводника обмотки статора $q_{1С}$ =1,057 *мм*.
Сечение изолированного элементарного проводника обмотки статора $q_{1ИС}$ = 1,474 *мм*.
Ротор электродвигателя короткозамкнутый без вентиляционных каналов.
Диаметр вала $d_В$ = 45 *мм*. Исполнение электродвигателя защищенное.

Расчет.

Число полюсов электродвигателя (по формуле 2):

$$2p_{\text{Н}} = \frac{6000}{3000} = 2$$

Полюсное деление статора (по формуле 4):

$$\tau_{1\text{Н}} = \frac{3{,}14 \times 15{,}2}{2} = 23{,}9 \text{ см.}$$

Активная длина сердечника статора (по формуле 6):

$$l_{1a} = 0{,}93 \times (12{,}0 - 2 \times 1{,}0) = 9{,}3 \text{ см.}$$

Активная длина сердечника ротора (по формуле 21):

$$l_{2a} = 0{,}93 \times 12{,}0 = 11{,}2 \text{ см.}$$

Число пазов на полюс и фазу обмотки статора:

$$q_{1\text{Н}} = \frac{36}{6 \times 1} = 6$$

Обмотка статора сохраняется двухслойной, укорочение шага принимается равными 0,7. Шаг обмотки статора $y_{1\text{Н}}$ = 0,7 × 36/2 = 12,6 округляется до ближайшего целого числа 13. Обмоточный коэффициент (по табл. 6) $k_{1\text{0Н}}$ = 0,853.
Соотношение между числами пазов статора, ротора и полюсов (по формуле 19):

$Z_2 \neq Z_1$	26 ≠ 36
$Z_2 \neq 0{,}5 \times Z_1$	26 ≠ 18
$Z_2 \neq 2 \times Z_1$	26 ≠ 72
$Z_2 \neq 6 \times p \times k$	26 ≠ 6, 12, 18, 24
$Z_2 \neq Z_1 \pm p$	26 ≠ 35, 37
$Z_2 \neq Z_1 \pm 2p$	26 ≠ 34, 38
$Z_2 \neq 0{,}5 \times Z_1 \pm p$	26 ≠ 17, 19
$Z_2 \neq 2 \times Z_1 \pm 2p$	26 ≠ 74
$Z_2 \neq 6 \times p \times k \pm 1$	26 ≠ 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25
$Z_2 \neq 6 \times p \times k \pm (2p \pm 1)$	26 ≠ 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 22, 23, 25, 27

Изменение числа полюсов не вызовет "прилипания" и "застревания" ротора, а также повышенного шума при работе электродвигателя.
Окружная скорость ротора (по формуле 44):

$$\upsilon_{\text{Р}} = \frac{\pi \times D_{2\text{Н}} \times n_{\text{Н}}}{60 \times 100} = \frac{3{,}14 \times 15{,}12 \times 3000}{60 \times 100} = 23{,}8 \text{ м/с}$$

т, е значительно меньше предельной. Прочность свободного конца вала диаметром 45 *мм*. согласно рисунку 23 удовлетворяет условию прочности.
Число эффективных проводов в пазу статора при сохранении типа обмотки (предварительно) по формуле (42):

$$w_{1\text{эпН}} = \frac{32}{2} = 16$$

Индукция в воздушном зазоре (по формуле 8):

$$B\delta_{\text{Н}} = \frac{2{,}5 \times 1 \times 220 \times 1 \times 10^2}{12{,}0 \times 36 \times 15{,}2 \times 16 \times 0{,}853} = 0{,}61\ T$$

Индукция в спинке статора (по формуле 13):

$$B_{1\text{СН}} = \frac{0{,}55 \times 0{,}61 \times 15{,}2 \times 12{,}0 \times 1}{2{,}5 \times 9{,}3 \times 1} = 2{,}6\ T$$

Индукция в спинке ротора (по формуле 24):

$$B_{2\text{СН}} = \frac{0{,}55 \times 0{,}61 \times 15{,}12 \times 12{,}0 \times 1}{3{,}0 \times 11{,}2 \times 1} = 1{,}8\ T$$

Индукция в спинке статора превосходит максимально допустимую и должна быть снижена. Индукция в теле ротора находится в допустимых пределах. Индукция в зубцах статора и ротора не проверяются, изменение числа полюсов не влияет на их величину. Индукцию в спинке статора принимаем равной 1,6 *Тл*. В соответствии с этим пересчитываем:

$$w_{1\text{ЭПН}} = \frac{16 \times 2{,}6}{1{,}6} = 26$$

Коэффициент заполнения паза статора в заводском электродвигателе при частоте вращения 1500 *об. мин* (по формуле 18):

$$K_{1\text{С}} = \frac{w_{1\text{ЭПС}} \times m_{1\text{С}} \times q_{1\text{ИС}}}{Q_{1\text{П}}} = \frac{32 \times 2 \times 1{,}474}{230} = 0{,}41$$

Сечение и диаметр изолированного элементарного проводника обмотки статора при сохранении коэффициента заполнения паза и числа элементарных проводников в эффективном проводе в заводском исполнении:

$$q_{1\text{ПН}} = \frac{Q_{1\text{П}} \times K_{1\text{С}}}{w_{1\text{ЭПН}} \times m_{1\text{С}}} = \frac{230 \times 0{,}41}{26 \times 2} = 1{,}8\ \text{мм}^2$$

$$d_{1\text{ИН}} = 1{,}13 \times \sqrt{q_{1\text{ИН}}} = 1{,}13 \times \sqrt{1{,}8} = 1{,}51\ \text{мм.}$$

Диаметр не изолированного элементарного проводника обмотки статора при сохранении марки провода ПЭЛБО с двухсторонней толщиной изоляции 0,21 *мм.*:

$$1{,}51 - 0{,}21 = 1{,}3\ \text{мм.}$$

Сечение не изолированного элементарного проводника обмотки статора:

$$q_{1\text{Н}} = \frac{3{,}14 \times 1{,}3^2}{4} = 1{,}327\ \text{мм}^2$$

Плотность тока в обмотке статора в заводском исполнении (по формуле 14):

$$J_{1\text{С}} = \frac{I_{1\Phi\text{С}}}{q_{1\text{С}} \times m_{1\text{С}} \times a_{1\text{С}}} = \frac{9{,}4}{1{,}057 \times 2 \times 1} = 4{,}45\ \ \text{А/мм}^2$$

Фазный ток сохранении плотности тока в заводском исполнении:

$$I_{1\text{ФН}} = 4{,}45 \times 1{,}327 \times 2 \times 1 = 11{,}8 \text{ А}$$

Мощность электродвигателя (из формулы 15):

$$P_{\text{Н}} = \frac{11{,}8 \times 380 \times 0{,}87 \times 0{,}89}{1000} = 6{,}0 \text{ квт}$$

Значения $\eta_{\text{Н}}$ и $cos\varphi$ приняты по таблице 7. Таким образом, при изменении частоты вращения от 1500 до 3000 *об. мин*. мощность электродвигателя увеличится в 6,0/4,5 = 1,33 раза.

Расчёт при замене медных проводов алюминиевыми.

Общие сведения.

При ремонте обмоток, связанном с заменой медных проводов алюминиевыми, основным фактором влияющим на ход расчета является различие в удельном сопротивлении проводов, составляющем при 20°С:

для меди ρ*м* = 0,017 *Ом*×*мм*^{2}/м.
для алюминия ρ*а* = 0,028 *Ом*×*мм*^{2}/м.

Отношение удельных сопротивлений алюминия и меди:

ρ*а*/ρ*м* = 0,028/0,017=1,65

Если вместо медной обмотки выполнить алюминиевую проводом того же размера, оставив без изменения индукцию в воздушном зазоре и число эффективных проводов в пазу, то при номинальном токе возрастут потери в обмотке. Потери в стали останутся без изменения. Чтобы сохранить потери в обмотке на прежнем уровне и тем самым сохранить суммарные потери электродвигателя необходимо снизить фазный ток. Это снижение определится следующим образом:
потери в фазе медной обмотки статора, *вт*:

$$\Delta P_{\text{М}} = \frac{I_{1\text{ФМ}}^2 \times \rho\text{м} \times l}{Q_{1\text{ЭПМ}} \times a_1} \quad (47)$$

потери в фазе алюминиевой обмотки статора, *вт*:

$$\Delta P_a = \frac{I_{1\text{Ф}a}^2 \times \rho a \times l}{Q_{1\text{ЭП}a} \times a_1}$$

где l – длина всех эффективных проводов в фазе. Здесь и далее к обозначениям, относящимся к исполнению обмотки медным проводом, добавлен индекс "*м*", к исполнению алюминиевым –"*а*".
Если:

$$Q_{1\text{ЭП}a} = Q_{1\text{ЭПМ}} \text{ и } \Delta P_{\text{М}} = \Delta Pa$$

$$I_{1\text{Ф}a} = \frac{I_{1\text{ФМ}}}{\sqrt{1{,}65}} = I_{1\text{ФМ}} \times 0{,}78 \quad (49)$$

т. е. фазный ток должен быть снижен на 22%.

Практически на столько же снижается и номинальная мощность электродвигателя. Если же требуется сохранить номинальные ток и мощность электродвигателя, то для сохранения потерь в обмотке статора следует увеличить сечение эффективного проводника. Это увеличение определяется следующим образом.
Так как:

$$\frac{I_{1\Phi}^2 \times \rho_{\text{М}} \times l}{Q_{1\text{ЭПМ}}} = \frac{I_{2\Phi}^2 \times \rho_a \times l}{Q_{1\text{ЭП}a}}$$

то:

$$\frac{\rho_{\text{М}}}{Q_{1\text{ЭПМ}}} = \frac{\rho a}{Q_{1\text{ЭП}a}} = \frac{1{,}65}{Q_{1\text{ЭП}a}}$$

или

$$Q_{1\text{ЭФ}a} = Q_{1\text{ЭФМ}} \times 1{,}65 \quad (50)$$

При изготовлении обмотки из круглых проводов диаметр неизолированного алюминиевого провода должен быть больше диаметра медного:

$$d_a = d_{\text{М}} \times \sqrt{1{,}65} = d_{\text{М}} \times 1{,}28$$

т. е. на 28%.
Совершенно ясно, что укладка проводов при таком увеличении диаметра невозможна. Тем не менее медная обмотка статора электродвигателей мощностью до 100 *квт* единой серии А и АО и тем более электродвигателей старых типов и серий может быть заменена на алюминиевую без снижения мощности электродвигателя или с минимальным снижением. Это достигается следующими способами:
– повышением класса нагревостойкости пазовой изоляции и изоляции обмоточных проводов от класса А, применяемого для электродвигателей серии А и АО, до класса С, что позволяет увеличить диаметр алюминиевой жилы по отношению к медной не на 28%, а только на 11%. При этом применяются алюминиевые обмоточные провода ПЭВА–2 на поливинилацеталевом лаке или ПЭЛРА–2 на полиамиднорезольном лаке, относящиеся по нагревостойкости к классу Е.
– увеличением коэффициента заполнения паза. По сравнению с медными (ПБД и ПЭЛБО) алюминиевые провода более эластичны, изоляция их тоньше. За счет этого коэффициент заполнения паза можно увеличить на 8–10% по сравнению с величинами указанными в таблице 5 для медных проводов. Некоторое улучшение достигается также применением современных, более тонких и электрически прочных материалов для пазовой изоляции.
– изменением типа обмотки, применением однослойной обмотки вместо двухслойной, что позволяет исключить прокладку между сторонами катушек в пазу.
– изменением схемы обмотки – уменьшением числа параллельных элементарных проводников в эффективном проводе или числа параллельных ветвей в фазе, чтобы применить элементарные проводники максимально допустимого диаметра.
После того как указанные мероприятия будут проведены, достаточно увеличить диаметр изолированного алюминиевого провода по отношению к медному на 4 – 5%. Исходя из этого составлена таблица 11 замены медного провода ПЭЛБО, применяемого для электродвигателей серии А и АО, на алюминиевый провод ПЭВЛ–2 (или ПЭЛРА–2). Аналогично для электродвигателей старых серий, у которых применены медные провода ПБД составлена таблица 12.
В электродвигателях серии А2 и АО2, где в заводском исполнении применены электроизоляционные материалы и обмоточные провода класса нагревостойкости Е, замена медных проводов алюминиевыми неизбежно связана со снижением мощности электродвигателя на 17–18%. Характеристики провода ПЭВД–2 (ПЭЛРА–2) приведены в таблице 13. Максимальный диаметр неизолированного алюминиевого провода для всыпных обмоток – 2,26 *мм*. Укладка в пазы провода большого диаметра затруднена из за его жесткости и может привести к повреждению пазовой изоляции.

Таблица 11.

ПЭЛБО			ПЭВА–2, ПЭЛРА–2			$da/d_М$	$qa/q_М$	допустимый ток электродвигателя %	
$d_М$, *мм.*	$d_{ИМ}$, *мм.*	$q_М$, *мм*².	da, *мм.*	$d_Иa$, *мм.*	qa, *мм*².			в классе А	в классе Е
0,44	0,595	0,152	0,57	0,625	0,256	1,30	1,68	100	100
0,47	0,625	0,173	0,59	0,645	0,273	1,26	1,58	98,5	100
0,49	0,645	0,188	0,62	0,675	0,302	1,27	1,60	100	100
0,51	0,670	0,204	0,64	0,700	0,322	1,26	1,58	98,0	100
0,53	0,690	0,221	0,67	0,730	0,353	1,27	1,60	100	100
0,55	0,710	0,238	0,69	0,750	0,374	1,26	1,57	98,5	100
0,57	0,730	0,255	0,69	0,750	0,374	1,21	1,47	94,0	100
0,59	0,750	0,273	0,72	0,780	0,407	1,22	1,49	95,0	100
0,62	0,780	0,302	0,74	0,805	0,436	1,19	1,42	93,5	100
0,64	0,800	0,322	0,77	0,835	0,466	1,20	1,45	94,0	100
0,67	0,830	0,353	0,80	0,865	0,503	1,19	1,42	93,5	100
0,69	0,850	0,374	0,83	0,895	0,541	1,20	1,45	94,0	100
0,72	0,890	0,407	0,86	0,925	0,581	1,19	1,48	93,5	100
0,74	0,910	0,430	0,90	0,965	0,636	1,22	1,48	95,0	100
0,77	0,940	0,466	0,93	0,995	0,679	1,21	1,46	94,0	100
0,80	0,970	0,503	0,96	1,025	0,724	1,20	1,44	94,0	100
0,83	1,000	0,541	0,96	1,025	0,724	1,15	1,34	90,0	100
0,86	1,030	0,581	1,00	1,080	0,785	1,16	1,35	91,0	100
0,90	1,070	0,636	1,04	1,120	0,849	1,15	1,33	90,0	100
0,93	1,100	0,679	1,08	1,160	0,916	1,17	1,35	92,0	100
0,96	1,130	0,724	1,12	1,200	0,985	1,17	1,36	92,0	100
1,00	1,200	0,785	1,16	1,240	1,067	1,16	1,34	91,0	100
1,04	1,240	0,849	1,20	1,280	1,131	1,15	1,33	90,0	100
1,08	1,290	0,916	1,25	1,330	1,237	1,16	1,34	91,0	100
1,12	1,320	0,985	1,30	1,380	1,327	1,16	1,35	91,0	100
1,16	1,360	1,067	1,35	1,430	1,431	1,17	1,36	92,0	100
1,20	1,400	1,131	1,40	1,480	1,539	1,17	1,36	92,0	100
1,25	1,450	1,227	1,45	1,530	1,651	1,16	1,35	91,0	100
1,30	1,500	1,327	1,50	1,580	1,767	1,15	1,33	90,0	100
1,35	1,550	1,431	1,56	1,640	1,911	1,15	1,33	90,0	100
1,40	1,605	1,539	1,62	1,700	2,061	1,16	1,34	91,0	100
1,45	1,655	1,651	1,68	1,760	2,217	1,16	1,34	91,0	100
1,50	1,705	1,767	1,74	1,820	2,379	1,16	1,34	91,0	100
1,56	1,765	1,911	1,81	1,890	2,573	1,16	1,34	91,0	100
1,62	1,825	2,061	1,88	1,860	2,776	1,16	1,34	91,0	100
1,68	1,885	2,217	1,95	2,030	2,986	1,16	1,35	91,0	100
1,74	1,945	2,379	1,95	2,030	2,986	1,12	1,26	87,5	97,0
1,81	2,015	2,573	2,02	2,100	3,205	1,12	1,25	87,5	97,0
1,88	2,085	2,786	2,10	2,190	3,464	1,12	1,25	87,5	97,0
1,95	2,155	2,986	2,10	2,190	3,464	1,08	1,16	84,5	94,0
2,02	2,230	3,205	2,26	2,350	4,011	1,12	1,25	87,5	97,0
2,10	2,310	3,464	2,26	2,350	4,011	1,08	1,16	84,5	94,0

Слева приведены величины допускаемого тока электродвигателя при сохранении изоляции класса нагревостойкости А, а справа – для случая перехода на изоляцию класса нагревостойкости Е в % по отношению к номинальному току при медной обмотке.

Таблица 12.

ПБД			ПЭВА–2, ПЭЛРА–2			$da/d_М$	$qa/q_М$	допустимый ток электродвигателя %	
$d_М$, *мм.*	$d_{ИМ}$, *мм.*	$q_М$, *мм*^{2}.	da, *мм.*	$d_Иa$, *мм.*	qa, *мм*^{2}.			в классе А	в классе Е
0,38	0,60	0,113	0,57	0,625	0,255	1,50	2,26	100	100
0,41	0,63	0,132	0,59	0,645	0,273	1,44	2,07	100	100
0,44	0,66	0,152	0,64	0,700	0,322	1,45	2,12	100	100
0,47	0,69	0,173	0,67	0,730	0,353	1,43	2,06	100	100
0,49	0,71	0,189	0,69	0,750	0,374	1,41	1,98	100	100
0,51	0,73	0,204	0,69	0,750	0,374	1,35	1,83	100	100
0,53	0,75	0,221	0,72	0,780	0,407	1,36	1,84	100	100
0,55	0,77	0,232	0,74	0,805	0,430	1,35	1,81	100	100
0,57	0,79	0,255	0,77	0,835	0,466	1,35	1,83	100	100
0,59	0,81	0,273	0,77	0,835	0,466	1,31	1,71	100	100
0,62	0,84	0,302	0,80	0,865	0,503	1,29	1,66	100	100
0,64	0,86	0,322	0,83	0,895	0,541	1,30	1,68	100	100
0,67	0,89	0,353	0,86	0,925	0,581	1,28	1,65	100	100
0,69	0,91	0,374	0,90	0,965	0,636	1,30	1,70	100	100
0,72	0,94	0,407	0,93	0,995	0,679	1,29	1,67	100	100
0,74	0,90	0,430	0,93	0,995	0,679	1,26	1,58	98,5	100
0,77	0,99	0,466	0,96	1,025	0,724	1,25	1,55	98,0	100
0,80	1,02	0,503	1,00	1,080	0,785	1,25	1,56	98,0	100
0,83	1,05	0,541	1,04	1,120	0,849	1,25	1,57	98,0	100
0,85	1,08	0,581	1,08	1,160	0,910	1,26	1,58	98,5	100
0,90	1,12	0,636	1,08	1,160	0,916	1,20	1,44	94,0	100
0,93	1,15	0,679	1,12	1,200	0,985	1,21	1,45	94,5	100
0,96	1,18	0,724	1,16	1,240	1,057	1,21	1,46	94,5	100
1,00	1,27	0,785	1,25	1,330	1,226	1,25	1,56	98,0	100
1,04	1,31	0,849	1,30	1,380	1,327	1,25	1,56	98,0	100
1,08	1,35	0,916	1,35	1,430	1,431	1,25	1,56	98,0	100
1,12	1,39	0,985	1,40	1,480	1,539	1,25	1,56	98,0	100
1,16	1,43	1,057	1,40	1,480	1,539	1,21	1,46	94,5	100
1,20	1,47	1,131	1,45	1,530	1,651	1,21	1,46	94,5	100
1,25	1,52	1,227	1,50	1,580	1,767	1,20	1,44	94,0	100
1,30	1,57	1,327	1,56	1,640	1,911	1,20	1,44	94,0	100
1,35	1,62	1,431	1,62	1,700	2,061	1,20	1,44	94,0	100
1,40	1,67	1,539	1,68	1,760	2,217	1,20	1,44	94,0	100
1,45	1,72	1,651	1,74	1,820	2,379	1,20	1,44	92,0	100
1,50	1,77	1,767	1,81	1,890	2,573	1,21	1,45	94,5	100
1,56	1,83	1,911	1,81	1,890	2,573	1,16	1,35	91,0	100
1,62	1,89	2,060	1,88	1,960	2,776	1,16	1,35	91,0	100
1,68	1,95	2,220	1,95	2,030	2,986	1,16	1,35	91,0	100
1,74	2,01	2,380	2,02	2,100	3,205	1,16	1,35	91,0	100
1,81	2,08	2,570	2,10	2,190	3,464	1,16	1,35	91,0	100
1,88	2,15	2,780	2,10	2,180	3,464	1,12	1,25	87,5	97
1,95	2,22	2,990	2,26	2,350	4,011	1,16	1,34	91,0	100
2,02	2,29	3,200	2,26	2,350	4,020	1,12	1,25	87,5	97
2,10	2,37	3,460	2,44	2,530	4,680	1,16	1,35	91,0	100

см. примечание к таблице 11.

Таблица 13.

диаметр алюминиевого провода, *мм*.	сечение алюминиевого провода, *мм*^{2}.	радиальная толщина изоляции, *мм*.	диаметр изолированного провода, *мм*.	масса провода, *кг/км*.
0,57	0,2552	0,0275	0,625	0,753
0,59	0,2734	0,0275	0,645	0,805
0,62	0,3019	0,0275	0,675	0,885
0,64	0.3217	0,030	0,70	0,998
0,67	0,3526	0,030	0,73	1,030
0,69	0,3739	0,030	0,75	1,125
0,72	0,4072	0,030	0,78	1,19
0,74	0,4301	0,0325	0,805	1,26
0,77	0,4657	0,0325	0,835	1,36
0,80	0,5027	0,0325	0,865	1,46
0,83	0,5401	0,0325	0,895	1,57
0,86	0,5809	0,0325	0,925	1,68
0,90	0,6362	0,0325	0,965	1,84
0,93	0.6793	0,0325	1,995	1,95
0,96	0,7238	0,0325	1,025	2,08
1,00	0,7854	0,040	1,08	2,28
1,04	0,8495	0,040	1,12	2,46
1,08	0,9161	0,040	1,16	2,65
1,12	0,9852	0,010	1,20	2,84
1,16	1,0568	0,040	1,24	3,04
1,20	1,1310	0,040	1,28	3,25
1,25	1,2270	0,040	1,33	3,51
1,30	1,327	0,040	1,38	3,79
1,35	1,431	0,040	1,43	4,08
1,40	1,539	0,040	1,48	4,39
1,45	1,651	0,040	1,53	4,69
1,50	1,767	0,040	1,55	5,02
1,56	1,911	0,040	1,64	5,41
1,62	2,061	0,040	1,80	5,83
1,68	2,217	0,040	1,76	6,26
1,74	2,378	0,040	1,82	6,70
1,81	2,573	0,040	1,89	7,24
1,88	2,776	0,040	1,96	7,80
1,95	2,986	0,040	2,03	8,37
2,02	3,205	0,040	2,10	8,97
2,10	3,461	0,045	2,19	10,1
2,26	4,011	0,045	2,35	11,2

Пример расчета.

Требуется рассчитать электродвигатель для замены медного провода алюминиевым. Паспортные данные электродвигателя, данные измерений и обмоточные данные статора (медная обмотка):

Мощность $P_М$ = 4,5 *квт*. Напряжение $U_М$ = 220/380 *в*. Ток $I_М$ = 16,3/9,4 *ампер*.
Коэффициент полезного действия $\eta_М$ = 85,5%. Коэффициент мощности $cos\varphi$ = 0,85.
Частота вращения (синхронная) $n_М$ = 1500 *об. мин*.

Внутренний диаметр сердечника D_1 = 15,2 *см*. Полная длина сердечника l_1 = 9 *см*.
Высота спинки сердечника $h_{1С}$ = 2,45 *см*.
Число радиальных вентиляционных каналов $n_{1К}$ = 1
Ширина радиального канала $b_{1К}$ = 1 *см*. Ширина зубца (расчетная) b_{13} = 0,7 *см*.
Коэффициент заполнения сердечника сталью 0,5 *мм*.
межлистовая изоляция – лак, k = 0,93, Число пазов Z_1 = 36. Площадь паза $Q_{1П}$ = 206,5 *мм*^{2}
Тип обмотки однослойная концентрическая.
Марка обмоточного провода (медного) ПЭЛБО.
Число эффективных проводов в пазу $w_{1ЭПМ}$ = 32.
Число элементарных проводников в эффективном проводе $m_{1М}$ = 1.
Число параллельных ветвей в пазу обмотки $a_{1М}$ = 1.
Диаметр не изолированного элементарного проводника $d_{1М}$ = 1,62 *мм*.
Диаметр изолированного элементарного проводника $d_{1ИМ}$ = 1,83 *мм*.
Сечение не изолированного элементарного проводника $q_{1М}$ = 2,06 *мм*^{2}.
Сечение изолированного элементарного проводника $q_{1ИМ}$ = 2,62 *мм*^{2}.

Расчет.

Число полюсов электродвигателя (по формуле 2):

$$2p = \frac{6000}{1500} = 4$$

Полюсное деление статора (по формуле 4):

$$\tau_1 = \frac{3{,}14 \times 15{,}2}{4} = 11{,}95 \text{ см.}$$

Зубцовый шаг (по формуле 5):

$$t_{13} = \frac{3{,}14 \times 15{,}2}{36} = 1{,}32 \text{ см.}$$

Активная длина сердечника (по формуле 6):

$$l_1 = 0{,}93 \times (9{,}01 - 1 \times 1{,}0) = 7{,}44 \text{ см.}$$

Число пазов на полюс и фазу:

$$q_1 = \frac{36}{6 \times 2} = 3$$

Обмоточный коэффициент (табл. 6) $k_{1ОМ}$ = 0,96.
Индукция в воздушном зазоре (по формуле 8) при обмотке из медного провода:

$$B\delta_{М} = \frac{2{,}5 \times 2 \times 220 \times 10^2}{9{,}0 \times 36 \times 15{,}2 \times 32 \times 0.96} = 0{,}73\ T$$

Индукция в зубцах статора (формула 12):

$$B_{13М} = \frac{0{,}73 \times 1{,}32 \times 9{,}0}{0{,}7 \times 7{,}44} = 1{,}66\ T$$

Индукция в спинке статора (по формуле 13):

$$B_{1\text{СМ}} = \frac{0{,}55 \times 0{,}73 \times 15{,}2 \times 9{,}0 \times 1}{2{,}45 \times 7{,}44 \times 2} = 1{,}51\ T$$

Плотность тока (по формуле 14):

$$J_{1\text{М}} = \frac{9{,}4}{2{,}06 \times 1 \times 1} = 4{,}56\ \text{А/мм}^2$$

Линейная нагрузка (по формуле 17):

$$A_{1\text{М}} = \frac{9{,}4 \times 36 \times 32}{3{,}14 \times 15{,}2 \times 1} = 227\ \text{А/см.}$$

Произведение:

$$J_{1\text{М}} \times A_{1\text{М}} = 4{,}56 \times 227 = 1040\ \ A^2/(\text{мм}^2 \times \text{см.})$$

Коэффициент заполнения паза (по формуле 18):

$$K_{1\text{М}} = \frac{32 \times 2{,}62}{206{,}5} = 0{,}405$$

Из расчета следует, что при обмотке статора выполненной из медного провода индукции в воздушном зазоре, спинке и зубцах статора имеют предельные значения (табл. 5). Поэтому при замене медного провода алюминиевым нельзя уменьшить число эффективных проводов в пазу – это вызовет соответствующее увеличение индукций. Также не следует стремиться увеличивать коэффициент заполнения паза, при диаметре провода близком к предельно допустимому, это может вызвать повреждение изоляции при укладке проводов в пазы. Линейная нагрузка и фактор нагрева (произведение $J_{1\text{М}} \times A_{1\text{М}}$), если есть необходимость, могут быть повышены.

При переходе на алюминиевую обмотку, сохраняя такими же, как при медной обмотке число эффективных проводов в пазу, число элементарных проводников в эффективном проводе, число параллельных ветвей в фазе обмотки и коэффициент заполнения паза оставляют неизменным, диаметр изолированного алюминиевого элементарного проводника $d_{1\text{И}a} = d_{1\text{ИМ}} = 1{,}83$ *мм*.

Для алюминиевого провода ПЭВА–2 или ПЭЛРА–2 двухсторонняя толщина изоляции (табл. 13) составляет 0,08 *мм*., т е. $d_{1a} = 1{,}83 - 0{,}08 = 1{,}75$, округляется до ближайшего стандартного размера – 1,74 *мм*. Сечение элементарного алюминиевого проводника $q_{1a} = 2{,}378$ *мм*^{2}. Согласно данным таблицы допустимая плотность тока для электродвигателей мощностью 1–10 *квт* с медной обмоткой статора составляет 5–6 *А*/*мм*^{2}. При алюминиевой обмотке плотность тока должна быть снижена на 10–20%, Принимая $J_1 = 4$ *А*/*мм*^{2} получаем фазный ток $I_{1\Phi} = 4 \times 2{,}378 = 9{,}512$ *А*. Отношение мощностей электродвигателя с медной и алюминиевой обмотками составит: $P_{\text{М}}/Pa = I_{1\Phi\text{М}}/I_{1\Phi a} = 9{,}4/9{,}512 = 0{,}99$, т. е. при замене медного провода обмотки статора на алюминиевый мощность электродвигателя практически сохраняется.

Расчет при изменении коэффициента заполнения паза.

Коэффициент заполнения паза медью определяется как отношение площади сечения всех изолированных проводов заложенных в паз к площади паза.

При ремонте электродвигателей старых выпусков коэффициент заполнения паза медью можно увеличить применив обмоточные провода с более тонкой изоляцией и выполнив изоляцию паза из современных более тонких материалов.

Естественно, если мы увеличиваем сечение проводов заложенных в паз, повышаются ток и мощность электродвигателя. Когда мощность увеличивается необходимо учитывать, что отношение максимального вращающего монета к номинальному – величина, нормируемая действующим ГОСТ на электрические машины.

Так как момент вращения электродвигателя связан с его мощностью соотношением $M_{\text{НОМ}} = 975 \times P/n$ *кг/м.*, то при увеличении мощности электродвигателя пропорционально увеличивается его номинальный момент, а для сохранения соотношения максимального и номинального моментов необходимо повысить $M_{\text{МАКС}}$.

Следует оговориться, что некоторые электродвигатели имеют запас в части кратности $M_{\text{МАКС}}/M_{\text{НОМ}}$. Если же этого запаса нет, его следует обеспечить, изменив обмоточные данные электродвигателя.

Увеличение возможно при повышении индукции в воздушном зазоре, причем $M_{\text{МАКС}}$ растет пропорционально квадрату индукции в воздушном зазоре.

Как следует из формулы (8), повышение индукции в воздушном зазоре может быть только за счет уменьшения числа эффективных проводов в пазу. Это влечет за собой увеличение потерь в стали. Но уменьшение числа проводов в пазу позволяет дополнительно увеличить их сечение (помимо увеличения сечения за счет повышения коэффициента заполнения паза) и тем самым снизить потери в обмотке,

Н. М. Слонимом (см. список литературы) установлено, что сохранение кратности максимального и номинального моментов, а также сохранение кратности суммарных потерь при увеличении коэффициента заполнения паза статора медью может быть при следующем соотношении новой и старой мощности и номинальном токе электродвигателя:

$$\varphi = \frac{P_{\text{Н}}}{P_{\text{С}}} = \frac{I_{1\text{ФН}}}{I_{1\text{ФС}}} = 0{,}7 \times b + 0{,}3 \quad (51)$$

где b – отношение коэффициентов заполнения паза медью:

$$b = \frac{K_{1\text{МН}}}{K_{1\text{МС}}} \text{ или } \varphi - 1 = 0{,}7 \times (b - 1) \quad (52)$$

т. е. каждому проценту увеличения коэффициента заполнения паза медью соответствует 0,7% увеличения мощности электродвигателя. Здесь и далее к обозначениям, относящимся к старому исполнению, добавляется индекс "с" и к новому исполнению – индекс "н". При указанном увеличении мощности следует число эффективных проводников в пазу уменьшить в соотношении:

$$\frac{w_{1\text{ЭП1Н}}}{w_{1\text{ЭП1С}}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}} \quad (53)$$

а сечение эффективного провода увеличить:

$$\frac{Q_{1\text{ЭПН}}}{Q_{1\text{ЭПС}}} = b \times \sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3} \quad (54)$$

При этих изменениях плотность тока в обмотке уменьшится:

$$\frac{J_{1\text{Н}}}{J_{1\text{С}}} = \sqrt{0{,}7 \times b + \frac{0{,}3}{b}} \quad (55)$$

а линейная нагрузка и индукция в зазоре увеличатся:

$$\frac{A_{1Н}}{A_{1С}} = \frac{B\delta_{Н}}{B\delta_{С}} = \sqrt{0,7 \times b + 0,3} \quad (56)$$

Также уменьшится произведение плотности тока на линейную нагрузку:

$$\frac{J_{1Н} \times A_{1Н}}{J_{1С} \times A_{1С}} = \frac{0,7 \times b + 0,3}{b} \quad (57)$$

Практически увеличение коэффициента заполнения паза статора медью может изменяться от 1,1 до 1,5. Для этих значений указанные выше соотношения сведены в таблицу 14. Если оставить потери на прежнем уровне и одновременно увеличить номинальную мощность электродвигателя его *кпд* возрастет, коэффициент мощности несколько уменьшится. Если при перерасчете электродвигателя индукция в воздушном зазоре превзойдет предельную величину, указанную в таблице 5, ее следует снизить до допустимой и исходя из этой сниженной индукции рассчитать все соотношения приведенные в таблице 14.

В качестве конкретного примера модернизация электродвигателя при изменении коэффициента заполнения паза медью можно привести результаты перемотки электродвигателя мощностью 14 *квт* напряжением 220/380 *в*, при которой мощность электродвигателя была увеличена до 17 *квт*.
Параметры электродвигателя в заводском исполнении следующие.

Число эффективных проводников в пазе $w_{1эп}$ = 32.
Число параллельных ветвей в фазе a_1 = 2.
Число элементарных проводников в эффективном проводе m_1 = 2.
Диаметр элементарного проводника без изоляции d_1 = 1,36 *мм*.
Марка изоляции провода ПЭЛБО. Двухсторонняя толщина изоляции Δ = 0,21 *мм*.
Диаметр изолированного элементарного провода $d_{1И}$ = 1,51 *мм*.
Толщина пазовой изоляции 0,6 *мм*. Коэффициент заполнения паза медью $K_{1М}$ = 0,29.

При ремонте оставлены без изменения схема обмотки, число элементарных проводников в эффективном проводе и число параллельных ветвей в фазе. Были изменены:
– число элементарных проводников в пазу (вместо 64 проводников было уложено 60). Это уменьшение вполне целесообразно, так как величина индукции в стали в заводском исполнении не была предельной и ее увеличение на 7% вполне допустимо,
– толщина пазовой изоляции, вместо изоляции 0,6 *мм*. на сторону установлена изоляция 0,3 *мм*. за счет применения современных, более тонких изоляционных материалов с повышенной электрической прочностью.
– марка и размер провода, взамен ПЭЛБО, у которого двухсторонняя толщина изоляции 0,21 *мм*., применен провод ПЭВ–2 с двухсторонней толщиной изоляции 0,11 *мм*. Диаметр не изолированного провода увеличен до 1,45 *мм*., и соответственно этому диаметр изолированного провода составил 1,56 *мм*.
Так как число проводников, закладываемых в паз, уменьшено и пазовая изоляция заменена па более тонкую, не значительное увеличение диаметра изолированного провода вполне допустимо. В результате модернизации коэффициент заполнения паза медью повысился до 0,38 и его отношение к коэффициенту заполнении паза в заводском исполнении b = 0,38/0,29 = 1,3. При указанном соотношении этих коэффициентов, по данным таблицы 14, увеличение номинальной мощности составляет 22%, т. е. мощность электродвигателя после модернизации равна 17 *квт*.

Таблица 14.

соотношение	расчетная формула	величина соотношения при b равном								
		1,1	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,5
$\frac{Р_Н}{Р_С}$, $\frac{I_{1ФН}}{I_{1ФС}}$	$0{,}7 \times b + 0{,}3$	1,07	1,105	1,14	1,175	1,21	1,215	1,28	1,315	1,35
$\frac{w_{1ЭПН}}{w_{1ЭПС}}$	$\frac{1}{\sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}}$	0,97	0,955	0,94	0,925	0,91	0,90	0,88	0,87	0,86
$\frac{Q_{1ЭПН}}{Q_{1ЭПС}}$	$\frac{b}{\sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}}$	1,14	1,21	1,28	1,36	1,43	1,50	1,58	1,66	1,74
$\frac{J_{1Н}}{J_{1С}}$	$\sqrt{0{,}7 \times b + \frac{0{,}3}{b}}$	0,94	0,915	0,890	0,875	0,850	0,825	0,805	0,790	0,775
$\frac{A_{1Н}}{A_{1С}}$, $\frac{B\delta_Н}{B\delta_С}$	$\sqrt{0{,}7 \times b + 0{,}3}$	1,035	1,05	1,07	1,085	1,10	1,115	1,13	1,145	1,16
$\frac{J_{1Н} \times А_{1Н}}{J_{1С} \times А_{1С}}$	$\frac{0{,}7 \times b + 0{,}3}{b}$	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,922	0,915	0,905	0,900

Расчет для определения обмоточных данных.

Общие сведения.

Как уже говорилось, расчет для определения (восстановления) обмоточных данных проводится тогда, когда в ремонт поступает электродвигатель без паспортного щитка, а обмотка либо демонтирована, либо повреждена в такой степени, что невозможно определить и при ремонте сохранить ее параметры. Также может быть, что обмотка электродвигателя по заводского исполнения и нет уверенности в ее технической правильности. В подобных случаях следует проверить нет ли в альбомах обмоточных данных такого электродвигателя, геометрические и конструктивные размеры которого совпадают с данными ремонтируемого электродвигателя. И если по альбомам не будет установлен паспорт электродвигателя, определить обмоточные данные расчетным путем на основании снятых с натуры размеров, руководствуясь указаниями по допустимым электромагнитным нагрузкам (табл. 5). Требуемое напряжение и частоту вращения заказчик должен оговорить в задании на ремонт.

При этих условиях складывается такая последовательность расчета.

1. Проверяют задание заказчика по частоте вращения. В начальной стадии расчета проверка предварительная. Число полюсов электродвигателя, при котором оптимально используются его активные материалы, а также достигаются максимальная надежность и долговечность уточняется в ходе дальнейшего расчета. Если в формулу (13) подставить из таблицы 5 средние значения индукции в воздушном зазоре и спинке статора, то примерная зависимость числа полюсов электродвигателя от внутреннего диаметра и высоты спинки выразится таким соотношением:

$$2p \approx \frac{0{,}6 \times D_1}{h_{1С}} \quad (58)$$

Напомним, что полученный результат округляется до ближайшего целого четного числа. Сопоставляя данные электродвигателей равной мощности, но с разной частотой вращения, можно заметить, что сравнительно большая спинка статора свидетельствует о малом числе полюсов, а малая высота спинки – о большом числе полюсов электродвигателя.

В электродвигателях мощностью до 100 *квт* можно установить следующую зависимость между отношением $D_{1Н}/D_1$ и числом полюсов, что также косвенно характеризует высоту спинки:

число полюсов	2	4	6	8 и 10
$D_{1Н}/D_1$	1,75 – 1,95	1,50 – 1,70	1,40 – 1,50	1,30 – 1,40

Здесь же следует оговориться, что в серийных электродвигателях например А и АО, из производственных соображений (чтобы экономить на вырубке листов стали штампом) при одних и тех же диаметрах могут быть различные числа полюсов, например 4 и 6, 6 и 8, 8 и 10. Для электродвигателей с короткозамкнутым ротором дополнительным признаком служит сопоставление предполагаемого числа полюсов с числом пазов статора и ротора согласно формуле (19).

2. Определяют полюсное деление и полезную мощность электродвигателя, *квт*:

$$P = A \times D_1^2 \times l_1 \times n_С \quad (59)$$

где A – коэффициент использования (постоянная мощности), значения которого в зависимости от полюсного деления τ_1 приведены на рисунке 24.

Мощность электродвигателя, определенная по приведенной формуле, приближенная. Ее вычисляют только для пользования при расчетах данными таблицы 5, где допустимые электромагнитные нагрузки указаны в зависимости от мощности электродвигателя.

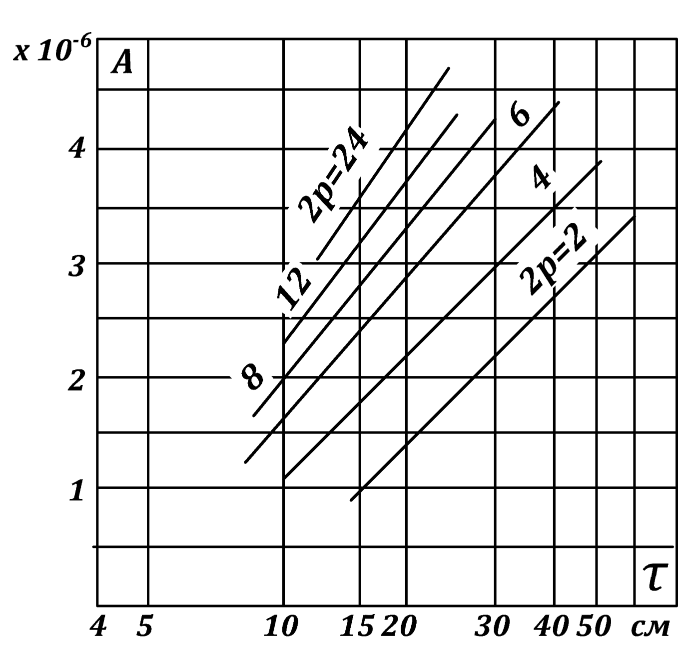


Рис. 24. Постоянная мощности A в зависимости от полюсного деления τ_1.

3. В соответствии с размерами статора и ротора электродвигателя, а также заданным и проверенным числом полюсов находят:

зубцовый шаг статора t_{13} (по формуле 5); зубцовый шаг ротора t_{23} (по формуле 20);
активную длину сердечника стали статора $l_{1}a$ (по формуле 6);
активную длину сердечника стали ротора, $l_{2}a$ (по формуле 21);
площадь паза статора $Q_{1П}$ и площадь паза ротора $Q_{2П}$ – по фактическим размерам или по рисунку 1;
расчетную ширину зубца статора b_{13} (по формуле 7);
расчетную ширину зубца ротора b_{23} (по формуле 22).

4. Руководствуясь таблицей 5 и сообразуясь с ориентировочной мощностью электродвигателя задаются величиной индукции в воздушном зазоре, вычисляют индукции в зубцах статора по формуле (12), в спинке статора по формуле (13), в зубцах ротора по формуле (23) и в спинке ротора по формуле (24).

Задавшись максимальным значением $B\delta$ начинают расчет (в табл. 5 для каждой мощности указаны предельные, максимальные и минимальные значения индукции). Целесообразность этого следует из содержания формулы (8), увеличение $B\delta$ влечет за собой пропорциональное уменьшение числа эффективных проводов в пазу, что, в свою очередь, позволяет увеличить сечение каждого эффективного провода и тем самым повысить допустимый ток и мощность электродвигателя.

Однако чрезмерная величина индукции в зазоре может привести к недопустимым индукциям в активной стали электродвигателя, увеличению намагничивающего тока, возрастанию потерь и снижению коэффициентов мощности и полезного действия электродвигателя. При очень больших индукциях конструктивные детали в спинке статора сильно нагреваются В таких случаях предварительно выбранную максимальную величину индукции в зазоре надо снизить так, чтобы значения сопряженных с ней индукции на других участках магнитной цепи электродвигателя находились в допустимых пределах.

Следует отметить, что с повышением индукции возрастают пусковой и максимальный моменты вращения, что положительно.

Занижение индукции влечет за собой уменьшение пускового и максимального моментов вращения, а также снижение мощности и коэффициента полезного действия электродвигателя. Это объясняется тем, что индукция снижается, когда увеличивается число эффективных проводов в пазу, а значит уменьшается их сечение

Чтобы величина индукции отремонтированного двигателя была близка к заложенной при конструировании следует задаться 2 – 3 вариантами индукции. Если при различных значениях $B\delta$ не удастся добиться требуемых результатов значит заказ на данную частоту вращения не правилен. Вот почему при неудовлетворительных результатах подсчета индукции следует повторить расчеты при другом, скорректированном числе полюсов.

Если при допустимом значении индукции в зазоре получаются завышенные индукции в спинке статора рекомендуется повторить расчет, увеличив число полюсов (тем самым разгружается спинка). Если же индукция $B_{1С}$ значительно меньше указанной в таблице 5, то число полюсов следует уменьшить.

Несколько завышенная, а тем более заниженная индукция в спинке статора при допустимых значениях индукции на других участках магнитопровода не может служить окончательным признаком того, что $B\delta$ выбрана не правильно, так как иногда заводы–изготовители по условиям производства могут выпускать электродвигатели с несколько завышенной или заниженной индукцией в спинке статора.

5. Выбирают тип обмотки для статора и для ротора.

В асинхронных двигателях малой и средней мощности для статоров применяют однослойную обмотку с концентрическими катушками, двухслойную и однослойную, цепные обмотки. В электродвигателях высокой мощности используют главным образом двухслойные обмотки, реже – однослойные с концентрическими катушками.

В электродвигателях серии А2 и АО2 мощностью от 0,6 до 100 *квт*, составляющих, как это указывалось, основной ремонтный фонд предприятий сельского хозяйства, для обмоток статора применена однослойная обмотка во всех электродвигателях 1–го и 2–го габаритов, а также в электродвигателях типа АО2 3–го и 4–го габаритов. Для всех остальных электродвигателей серии применена двухслойная обмотка.

В электродвигателях серии А и АО 3–го и 4–го габаритов и для 4 и 6–полюсных электродвигателей 5–го габарита – однослойная обмотка, во всех остальных электродвигателях этой серии – двухслойная обмотка. При ремонте электродвигателей названных серий целесообразно сохранить указанные типы обмоток статора.

Если ремонтируются электродвигатели старых типов и серий, а также поступившие в ремонт с демонтированной обмоткой, при выборе вида обмотки следует руководствоваться следующими соображениями.
У двухслойных обмоток существенные преимущества перед однослойными, расход обмоточных проводов на 10–15% меньше, форма кривой намагничивающей силы обмотки приближается к синусоидальной, что в связи с меньшим активным и индуктивным сопротивлением обмотки повышает коэффициенты полезного действия и мощности. Двухслойные обмотки выполнимы при q любой дробности, что также очень важно. Зато у однослойных обмоток коэффициент заполнения паза медью выше чем у двухслойных, нет прокладок между верхними и нижними сторонами катушек заложенных в пазы.
С учетом того, что укорочение шага связано с увеличением числа эффективных проводов в пазу, применение однослойной обмотки для мелких электродвигателей может дать большую мощность, чем при двухслойной обмотке.
Для всыпных обмоток статора трудоемкость укладки однослойных обмоток меньше, кроме тех случаев, когда применяют провод большого (предельно допустимого) диаметра, отгибать лобовые части здесь легче у двухслойных, чем у однослойных катушек, потому что двухслойная в два раза меньше.
Обмотку ротора выбирают к электродвигателям с фазовыми роторами. Короткозамкнутые роторы вообще не ремонтируются, а если в этом все–таки есть необходимость, то тип его обмотки совершенно определен.
Наиболее распространены фазные роторы с трехфазной двухслойной стержневой волновой обмоткой с двумя стержнями в пазу. Эти обмотки обычно с диаметральным шагом и целым числом пазов па полюс и фазу q_2 или реже с не целым числом q_2, но с его дробной частью равной ½. Соединение фаз чаще всего выполнено звездой.

Как уже говорилось, каждый стержень (полусекции) может состоять либо из одного массивного провода прямоугольного или специального профиля, либо подразделяться на несколько параллельных проводов для роторов больших токов.
Если обмотки стержневые пазы ротора обычно закрыты или в них сделан небольшой шлиц. Когда пазы закрыты, обмотку выполняют также протяжной, с однослойными концентрическими катушками из круглого провода. Роторы этого вида устарели и ремонтируются теперь редко. В тех же роторах, где пазы со шлицами применяют всыпные обмотки, чаще всего с однослойными и реже с двухслойными катушками из круглого провода.
Массовое применение для роторов нашли двухслойные обмотки в электродвигателях с открытыми пазами единой серии типа АК мощностью до 100 *квт*.
После выбора типа обмотки статора вычисляют шаг обмотки:
при однослойной обмотке – диаметральный:

$$y_{1\text{П}} = \frac{Z_1}{2p}$$

и при двухслойной – укороченный:

$$y_{1\text{П}} = \frac{\beta_1 \times Z_1}{2p}$$

Здесь β_1 коэффициент укорочения (обычно от 0,75 до 0,85).

По таблице 6 находят обмоточный коэффициент для статора k_{10} Аналогично для фазового ротора вычисляют значение k_{20}.

6, Определяют на основании формулы (8) число эффективных проводов в пазу статора:

$$w_{1ЭП} = \frac{10^2 \times 2{,}5 \times U_{1Ф} \times p \times a_1}{B\delta \times Z_1 \times D_1 \times l_1 \times k_{10}} \quad (60)$$

В формуле (60), помимо выбранных по соображениям указанным в пункте 4 данного расчета, индукции числа полюсов, числа пазов и размеров сердечника статора участвует также величина a_1 – число параллельных ветвей в фазе обмотки статора.
Разбивка обмотки фазы на параллельные ветви и как дальше будет указано, разбивка эффективного провода в пазу на элементарные проводники необходимы в том случае когда провод такого размера, что не проходит в шлиц паза.

Определяя числа параллельных ветвей в каждой фазе обмотки статора и элементарных проводников в эффективном проводе, заложенном в паз надо руководствоваться следующим:
– при заданном сечении эффективного провода стремиться применить один провод пли несколько проводов максимально допустимого сечения. Максимальный диаметр провода (без изоляции) не должен превышать для обмоток из медного провода 1,81 *мм*., для обмоток из алюминиевого провода – 2,26 *мм*.
– диаметр изолированного провода должен быть на 0,6–0,8 *мм*. меньше размера шлица паза. Иначе изоляция провода при укладке может повредиться.
Число параллельных ветвей в фазе не может быть произвольным (см. главу "двухслойные обмотки"). Для практических целей при выборе числа параллельных ветвей для электродвигателей мощностью до 1000 *квт* можно пользоваться таблицей 15.

Таблица 15.

вид обмотки	рекомендуемое число параллельных ветвей при числе полюсов					
	2	4	6	8	10	12
двухслойная	1	1, 2	1, 2, 3	1, 2, 4	1, 2, 5	1, 2, 3, 4, 6
однослойная	1	1, 2	1, 3	1, 2, 4	1, 5	1, 2, 3, 6

В электродвигателях малой и средней мощности стремятся выполнить обмотку $a_1 = 1$ и $m_1 = 1$, причем в электродвигателях малой мощности это условие обычно получается автоматически. Число эффективных проводов в пазу ротора принимают исходя из допустимой величины напряжения между кольцами, для наиболее употребительных двухслойных стержневых волновых обмоток, как указывалось $w_{2ЭП} = 2$.
7. Определяют сечение и диаметр изолированного, а также не изолированного элементарного проводника обмотки статора:

$$q_{1И} = \frac{K \times Q_{1П}}{n_1} = \frac{K \times Q_{1П}}{m_1 \times w_{1ЭП}}$$

где n_1 – общее число элементарных проводников в пазу.

Число элементарных проводников в эффективном проводе предопределено числом параллельных ветвей в фазе обмотки – a_1, чем больше a_1, тем соответственно меньше m_1. Следует учитывать, что с уменьшением m_1 повышается коэффициент заполнения паза медью. Поэтому $q_{1И}$ а следовательно, и $d_{1И}$ надо определять при 2 – 3 вариантах числа m_1 и выбрать тот вариант, при котором будет ближе к максимально допустимому.

Диаметр изолированного элементарного проводника обмотки статора:

$$d_{1И} = 1{,}13 \times \sqrt{q_{1И}}$$

Диаметр не изолированного элементарного проводника:

$$d_1 = d_{1И} - \Delta$$

где Δ – двухсторонняя толщина изоляции. Диаметры обмоточных проводов стандартизированы (табл. 16), толщина изоляции указана в таблице 17.

Если нет провода требуемого размера его приходится заменять двумя (и более) проводами эквивалентными по суммарному сечению. Однако надо учесть, что такая замена всегда ухудшает коэффициент заполнения паза.

8. Выбирают по таблице 5 три варианта плотности тока в обмотке статора. Для каждого варианта определяют фазный ток статора (по формуле 14), линейную нагрузку (по формуле 17) и вычисляют произведение $J_1 \times A_1$. Из принятых вариантов выбирают тот, при котором $J_1 \times A_1$ и будет соответствовать значениям, указанным в таблице 5.

Если при всех вариантах J_1 величины A_1 и $J_1 \times A_1$ будут превосходить допустимые следует снизить J_1 в такой степени, чтобы значения A_1 и $J_1 \times A_1$ были близки к максимальным значениям таблицы 5.

Заниженное значение A_1 и $J_1 \times A_1$ указывает, что электродвигатель недостаточно использован, плотность тока следует повысить так, чтобы значения A_1 и $J_1 \times A_1$ находились в пределах хотя бы минимальных значений таблицы 5.

9. Вычисляют фазный ток ротора по формуле 29 и определяют плотность тока по формуле 30. Если значение J_2 превышай допустимое (табл. 5), следует снизить $I_{1Ф}$ до такой степени, чтобы значение J_2 уложилось в установленные пределы.

Для короткозамкнутых роторов со сварной медной или латунной беличьей клеткой вычисляют токи в стержне по формуле 32 и в короткозамыкающем торцевом кольце – по формуле 33. Если обмотка короткозамкнутого ротора демонтирована, размеры н форму стержней восстанавливают по форме, паза, а сечение короткозамыкающего кольца определяют из соотношения:

$$Q_K = \frac{I_K}{J_K}$$

где I_K – ток и J_K – плотность тока в короткозамыкающем кольце.

Размеры короткозамыкающего кольца выбирают с таким расчетом, чтобы возникающие в них механические напряжения при вращении, определяемые формулами 35 и 36, не превышали допустимые величины.

10. Определяют номинальную мощность электродвигателя (мощность на валу) из формулы 15 – при соединении фаз в звезду или из формулы 16 – при соединении фаз в треугольник. Значения η и $cos\varphi$ подбирают по одной из таблиц 7 – 10.

Таблица 16.

диаметр провода, *мм.*	сечение провода, *мм*^{2}	масса провода, *кг.*	сопротивление 1 *км.* провода при 20°*С, Ом*	диаметр провода, *мм.*	сечение провода, *мм*^{2}	масса провода, *кг.*	сопротивление 1 *км.* провода при 20°*С, Ом.*
0,11	0,00950	0,0845	1849	0,69	0,374	3,32	46,9
0,12	0,01131	0,1005	1552	0,72	0,407	3,62	43,1
0,13	0,01327	0,1180	1322	0,74	0,430	3,82	40,8
0,14	0,01539	0,1368	1140	0,77	0,466	4,14	37,7
0,15	0,01767	0,1571	993	0,80	0,503	4,47	34,9
0,16	0,0201	0,1788	873	0,83	0,541	4,81	32,4
0,17	0,0227	0,202	773	0,86	0,581	5,16	30,2
0,18	0,0255	0,226	688	0,90	0,636	5,66	27,6
0,19	0,0284	0,252	618	0,93	0,679	6,04	25,9
0,20	0,0314	0,279	559	0,96	0,724	6,43	24,3
0,21	0,0346	0,308	507	1,00	0,785	6,98	22,4
0,23	0,0415	0,369	423	1,04	0,849	7,55	20,7
0,25	0,0491	0,436	358	1,08	0,916	8,14	19,2
0,27	0,0573	0,509	306	1,12	0,985	8,75	17,82
0,29	0,0661	0,587	265	1,16	1,057	9,40	16,61
0,31	0,0755	0,671	233	1,20	1,131	10,05	15,52
0,33	0,0855	0,760	205	1,25	1,227	10,91	14,33
0,35	0,0962	0,855	182,4	1,30	1,327	11,80	13,22
0,38	0,1134	1,008	154,8	1,36	1,431	12,73	12,28
0,41	0,1320	1,173	132,9	1,40	1,539	13,68	11,40
0,44	0,1521	1,352	115,4	1,45	1,651	14,68	10,62
0,47	0,1735	1,542	101,2	1,50	1,767	15,71	9,03
0,49	0,1885	1,676	98,1	1,55	1,911	16,99	9,18
0,51	0,204	1,816	86,0	1,62	2,06	18,32	8,52
0,53	0,221	1,96	79,4	1,68	2,22	19,71	7,90
0,55	0,238	2,11	73,7	1,74	2,38	21,1	7,37
0,57	0,255	2,27	68,8	1,81	2,57	22,9	6,83
0,59	0,273	2,43	64,3	1,88	2,78	24,7	6,31
0,62	0,302	2,68	58,1	1,95	2,99	26,5	5,88
0,61	0,392	2,86	54,5	2,02	3,20	28,5	5,49
0,67	0,353	3,13	49,7	2,10	3,46	30,8	5,07
				2,26	4,01	35,7	4,88

Таблица 17.

Марка провода	Изоляция провода	Двухсторонняя толщина изоляции (*мм.*) при диаметре не изолированного провода, *мм.*										
		0,05–0,09	0,10–0,19	0,20–0,25	0,27–0,29	0,31–0,35	0,38–0,49	0,51–0,69	0,72–0,90	1,00–1,45	1,50–2,1	2,26
ПЭЛ	Изолирован лакостойкой эмалью	–	0,02	0,025	0,04	0,04	0,04–0,05	0,05	0,06	0,07–0,08	0,08–0,10	–
ПЭЛУ	То же, но с утолщенной изоляцией		0,035	0,04	0,06	0,06	0,06–0,07	0,07	0,08–0,09	0,10–0,11	0,11–0,13	–
ПЭВ–1	Изолирован одним слоем эмали винифлекс	0,02	0,025–0,03	0,03–0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05–0,06	0,08	0,08–0,10	–
ПЭВ–2	То же, но изолирован двумя слоями эмали	0,03	0,03–0,04	0,04–0,05	0,05	0,05–0,06	0,06	0,07–0,08	0,06–0,09	0,11	0,11–0,13	–
ПЭЛР–1	Изолирован одним слоем эмали на полиамиднорезольном лаке	–	0,02–0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,08	0,09	–
ПЭЛР–2	То же, но изолирован двумя слоями эмали	–	0,075	0,09	0,10	0,105	0,11	0,115	0,125	0,135	0,155	–
ПЭЛШО	Изолирован лакостойкой эмалью и одним слоем натурального шелка	0,07	0,075	0,09	0,10	0,105	0,11	0,115	0,125	0,135	0,155	–
ПЭЛШКО	Изолирован лакостойкой эмалью и одним слоем шелка или капрона	0,07	0,075	0,09	0,10	0,105	0,11	0,115	0,125	0,135	0,155	–
ПЭЛБО	Изолирован лакостойкой эмалью и одним слоем хлопчатобумажной пряжи	–	–	0,125	0,155	0,16	0,165	0,17	0,18	0,21	0,21	–
ПЭЛКО	Изолирован лакостойкой эмалью и утолщенным слоем шелка или капрона	–	–	0,125	0,155	0,15	0,165	0,17	0,18	0,21	0,21	–
ПЭЛБД	Изолирован лакостойкой эмалью и двумя слоями хлопчатобумажной пряжи	–	–	–	–	–	–	–	0,28	0,33	0,33	–
ПВО	Изолирован одним слоем хлопчатобумажной пряжи	–	–	0,10	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,14	–
ПБД	То же, но изолирован двумя слоями пряжи	–	–	0,19	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,27	0,27	0,33
ПЭТСО	Изолирован нагревостойкой эмалью и одним слоем бесщелочного стекловолокна					0,20	0,20	0,20	0,22	0,22	0,22–0,24	

Таблица 17 продолжение.

Марка провода	Изоляция провода	Двухсторонняя толщина изоляции (*мм.*) при диаметре не изолированного провода, *мм.*										
		0,05–0,09	0,10–0,19	0,20–0,25	0,27–0,29	0,31–0,35	0,38–0,49	0,51–0,69	0,72–0,90	1,00–1,45	1,50 – 2,1	2,26
ПСД	То же, но изолирован двумя слоями стекловолокна	–	–	–	–	0,23	0,23	0,25	0,25	0,27	0,27	0,33
ПДА	Изолирован одним слоем асбестовой ровницы с подклейкой нагревостойким лаком	–	–	–	–	–	–	–	–	0,30	0,30	0,35
ПЭВА–1	Изолирован аналогично проводу ПЭВ–1	–	–	–	–	–	–	0,045	0,045–0,05	0,07	0,07–0,085	–
ПЭЛРА–1	Изолирован аналогично проводу ПЭЛР–1	–	–	–	–	–	–	0,055–0,06	0,06–0,065	0,08	0,06–0,08	–
ПЭВА–2	Изолирован аналогично проводу ПЭВ–2	–	–	–	–	–	–	0,055–0,06	0,06 0,065	0,08	0,06–0,08	
ПЭЛРА–2	Изолирован аналогично проводу ПЭЛР–2	–	–	–	–	–	–	0,055–0,06	0,06–0,065	0,08	0,08–0,09	–
АПСД	Изолирован аналогично проводу ПСД	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,025	0,03

Пример расчета.

Требуется произвести расчет электродвигателя поступившего в ремонт без заводского паспорта, с демонтированной обмоткой. Необходимо определить его обмоточные данные и мощность.

Техническое задание. Электродвигатель предназначается для работы при напряжении 220/380 *в* и частоте вращения 1000 *об. мин*. Данные намерений:

Наружный диаметр сердечника статора $D_{1Н}$ = 23,1 *см*.
Внутренний диаметр сердечника статора D_1 = 14.5 *см*.
Наружный диаметр сердечника ротора $D_{2Н}$ = 14,42 *см*.
Полная длина сердечника статора l_1 = 23,5. Полная длина сердечника ротора l_2 = 24,2 *см*.
Число радиальных вентиляционных каналов сердечника статора $n_{1К}$ = 2
Число радиальных вентиляционных каналов сердечника ротора $n_{2К}$ = 2
Ширина радиального канала сердечника статора $b_{1К}$ = 1 *см*.
Ширина радиального канала сердечника ротора $b_{2К}$ = 1 *см*.
Высота спинки сердечника статора $h_{1С}$ = 2,8 *см*.
Высота спинки сердечника ротора $h_{2С}$ = 2,6 *см*.
Ширина зубца статора в самом узком месте b'_{13} = 0,6 *см*.
Ширина зубца статора в самом широком месте b''_{13} = 0,84 *см*.
Ширина зубца ротора в самом узком месте b'_{23} = 0,9 *см*.

Ширина зубца ротора в самом широком месте b''_{23} = 1,2 *см*.
Толщина листов стали сердечников 0,5 *мм*., межлистовая изоляция – лак, k = 0,93
Число пазов статора Z_1 = 36. Число пазов ротора Z_2 = 26.
Площадь паза статора $Q_{1П}$ = 125 *мм*^{2}. Форма паза овальная.
Ротор электродвигателя короткозамкнутый.
Исполнение электродвигатели защищенное.

Расчет.

Число полюсов электродвигателя соответствующее его размерам, по формуле (58):

$$2p = \frac{0{,}6 \times D_1}{h_{1C}} = \frac{0{,}6 \times 14{,}5}{2{,}8} = 3{,}1$$

округляется до ближайшего четного числа – 4.
Отношение наружного и внутреннего диаметров сердечника статора

$$\frac{D_{1Н}}{D_1} = \frac{23{,}1}{14{,}5} = 1{,}59$$

что соответствует четырехполюсным электродвигателям.
Таким образом есть основания предполагать, что заданная заказчиком частота вращения не является оптимальной, и дальнейшие расчеты производятся по двум вариантам: при числе полюсов $2p$ = 6 согласно заданию, при числе полюсов $2p$ = 4 согласно размерам электродвигателя.

при $2p$ = 6

$Z_2 \neq Z_1$	26 ≠ 36
$Z_2 \neq 0{,}5 \times Z_1$	26 ≠ 18
$Z_2 \neq 2 \times Z_1$	26 ≠ 72
$Z_2 \neq 6 \times p \times k$	26 ≠ 18, 36, 54, 72
$Z_2 \neq Z_1 \pm p$	26 ≠ 33, 39
$Z_2 \neq Z_1 \pm 2p$	26 ≠ 30, 42
$Z_2 \neq 0{,}5 \times Z_1 \pm p$	26 ≠ 15, 21
$Z_2 \neq 2 \times Z_1 \pm 2p$	26 ≠ 66, 78
$Z_2 \neq 6 \times p \times k \pm 1$	26 ≠ 17, 19, 35, 37, 53, 55, 71, 73
$Z_2 \neq 6 \times p \times k \pm (2p \pm 1)$	26 ≠ 11, 13, 23, 25, 29, 31, 41, 43, 47, 49, 59, 61, 65, 67, 77, 79

при $2p$ = 4

$Z_2 \neq Z_1$	26 ≠ 36
$Z_2 \neq 0{,}5 \times Z_1$	26 ≠ 18
$Z_2 \neq 2 \times Z_1$	26 ≠ 72
$Z_2 \neq 6 \times p \times k$	26 ≠ 12, 24, 36, 48
$Z_2 \neq Z_1 \pm p$	26 ≠ 34, 38
$Z_2 \neq Z_1 \pm 2p$	26 ≠ 32, 40
$Z_2 \neq 0{,}5 \times Z_1 \pm p$	26 ≠ 26, 20
$Z_2 \neq 2 \times Z_1 \pm 2p$	26 ≠ 68, 76
$Z_2 \neq 6 \times p \times k \pm 1$	26 ≠ 11, 13, 23, 25, 35, 37, 47, 49
$Z_2 \neq 6 \times p \times k \pm (2p \pm 1)$	26 ≠ 7, 9, 15, 17, 19, 21, 27, 29, 31, 33, 39, 41, 43, 45, 51, 53

Полюсное деление статора по формуле 4:

$$\text{при } 2p = 6 \quad \tau_1 = \frac{3{,}14 \times 14{,}5}{6} = 7{,}6 \text{ см.}$$

$$\text{при } 2p = 4 \quad \tau_1 = \frac{3{,}14 \times 14{,}5}{4} = 11{,}4 \text{ см.}$$

Ориентировочная мощность статора, по формуле 59:

при $2p = 6$ по рис. 24, $A = 1{,}0 \times 10^{-6}$ $P = 1{,}0 \times 10^{-6} \times 14{,}5^2 \times 23{,}5 \times 1000 = 5{,}0$ квт.

при $2p = 4$ по рис. 24, $A = 1{,}15 \times 10^{-6}$ $P = 1{,}15 \times 10^{-6} \times 14{,}5^2 \times 23{,}5 \times 1500 = 8{,}5$ квт.

Зубцовый шаг статора по формуле 5:

$$t_{13} = \frac{3{,}14 \times 14{,}5}{36} = 1{,}26 \text{ см.}$$

Зубцовый шаг ротора по формуле 20:

$$t_{23} = \frac{3{,}14 \times 14{,}42}{26} = 1{,}74 \text{ см.}$$

Активная длина сердечника статора по формуле 6:

$$l_{1a} = 0{,}93 \times (23{,}5 - 2 \times 1{,}0) = 20 \text{ см.}$$

Активная длина сердечника ротора по формуле 21:

$$l_{2a} = 0{,}93 \times (24{,}2 - 2 \times 1{,}0) = 20{,}6 \text{ см.}$$

Расчетная ширина зубца статора по формуле 7:

$$b_{13} = \frac{2 \times 0{,}6}{3} + \frac{0{,}83}{3} = 0{,}68 \text{ см.}$$

Расчетная ширина зубца ротора по формуле 22:

$$b_{23} = \frac{2 \times 0{,}9}{3} + \frac{1{,}2}{3} = 1{,}0 \text{ см.}$$

Индукция в воздушном зазоре принимается предварительно по максимальному значению таблицы 5 для электродвигателей мощностью 1 – 10 *квт*: $B\delta = 0{,}7$ *Т*.

Индукция в зубцах статора по формуле 12:

$$B_{13} = \frac{0{,}7 \times 1{,}26 \times 23{,}5}{0{,}68 \times 20} = 1{,}52 \; T$$

Индукция в зубцах ротора по формуле 23:

$$B_{23} = \frac{0{,}7 \times 1{,}74 \times 24{,}2}{1{,}0 \times 20{,}6} = 1{,}43 \; T$$

Индукция в спинке статора по формуле 13:
при $2p = 6$

$$B_{1С} = \frac{0{,}55 \times 0{,}7 \times 14{,}5 \times 23{,}5}{2{,}8 \times 20{,}0 \times 3} = 0{,}78\ T$$

при $2p = 4$

$$B_{1С} = \frac{0{,}55 \times 0{,}7 \times 14{,}5 \times 23{,}5}{2{,}8 \times 20{,}0 \times 2} = 1{,}17\ T$$

Индукция в спинке ротора по формуле 24:
при $2p = 6$

$$B_{2С} = \frac{0{,}55 \times 0{,}7 \times 14{,}12 \times 24{,}2}{2{,}6 \times 20{,}6 \times 3} = 0{,}83\ T$$

при $2p = 4$

$$B_{2С} = \frac{0{,}55 \times 0{,}7 \times 14{,}42 \times 24{,}2}{2{,}6 \times 20{,}6 \times 2} = 1{,}26\ T$$

Результаты подсчета показывают, что при $2p = 6$ индукции в спинках статора и ротора занижены, при частоте вращения соответствующем этому числу полюсов электродвигатель будет недостаточно использован.
При $2p = 4$ (частота вращения 1500 *об. мин.*) индукции в спинках статора и ротора соответствуют рекомендованным значениям, приведенным в таблице 5, что указывает на полное использование электродвигателя. Таким образом задание заказчика не предусматривает оптимальное использование электродвигателя, его следует признать ошибочным. Дальнейший расчет электродвигателя производится при $2p = 4$.
Для еще более полного использования электродвигателя целесообразно несколько повысить величину предварительно выбранной индукции в воздушном зазоре и тем самым увеличить индукцию в спинках п зубцах сердечников статора и ротора; хотя при $2p = 4$ эти индукции соотносятся к рекомендациями таблицы 5, они находится на нижнем пределе допустимых значении. Целесообразно увеличить до 0,75 *Т*. При этом индукции в зубцах и спинках сердечников статора и ротора также повысятся и составят

$$B_{13} = \frac{0{,}75 \times 1{,}52}{0{,}7} = 1{,}63\ T \qquad B_{23} = \frac{0{,}75 \times 1{,}43}{0{,}7} = 1{,}53\ T$$

$$B_{1С} = \frac{0{,}75 \times 1{,}17}{0{,}7} = 1{,}25\ T \qquad B_{2С} = \frac{0{,}75 \times 1{,}26}{0{,}7} = 1{,}35\ T$$

Выбираем тип обмотки согласно ранее описанным соображениям касающихся типов обмотки. Принимаем двухслойную обмотку с укороченным шага 0,75 – 0,85. Шаг обмотки:

$$y_{1П} = \frac{0{,}75 \div 0{,}85 \times Z_1}{2p} = \frac{0{,}75 \div 0{,}85 \times 36}{4} = 6{,}8 - 7{,}7$$

Принимается целое число $y_{1П} = 7$ (1 – 8), при котором укорочение шага составит:

$$\beta_1 = \frac{y_{1П} \times 2p}{Z_1} = \frac{7 \times 4}{36} = 0{,}775$$

Так как в таблице 6 не приведен обмоточный коэффициент для этого укорочения шага, его следует определить интерполированием между двумя приведенными значениями укорочения шага – 0,75 и 0,8 согласно чему $k_{10} = 0{,}937$.
Согласно таблице 14 число параллельных ветвей в фазе может быть равным 1 или 2.

При a_1 = 1 число эффективных проводов в пазу по формуле 8:

$$w_{1\text{эп}} = \frac{2{,}5 \times 220 \times 2 \times 1 \times 10^2}{0{,}75 \times 36 \times 14{,}5 \times 23{,}5 \times 0{,}937} = 12{,}4$$

Полученное число следует округлить до ближайшего целого числа, т. е. до 13. Однако для двухслойной обмотки желательно чтобы число эффективных проводов (витков) в пазу было четным, в противном случае пришлось бы применять обмотку состоящую из не разновитковых катушек, в нашем случае 7 и 6 витковых.
При $w_{1\text{эп}}$ = 14 индукции в воздушном зазоре, в зубцах и спинках сердечников понизятся и составят, T:

$$B\delta = \frac{12{,}7 \times 0{,}75}{14} = 0{,}68 \qquad B_{13} = \frac{12{,}7 \times 1{,}63}{14} = 1{,}18\ T \qquad B_{23} = \frac{12{,}7 \times 1{,}53}{14} = 1{,}39\ T$$

$$B_{1\text{С}} = \frac{12{,}7 \times 1{,}25}{14} = 1{,}13\ T \qquad B_{2\text{С}} = \frac{12{,}7 \times 1{,}35}{14} = 1{,}22\ T$$

При $w_{1\text{эп}}$ = 1 индукции в воздушном зазоре, в зубцах и спинках сердечников повысятся и составят, T:

$$B\delta = \frac{12{,}7 \times 0{,}75}{12} = 0{,}8 \qquad B_{13} = \frac{12{,}7 \times 1{,}63}{12} = 1{,}72\ T \qquad B_{23} = \frac{12{,}7 \times 1{,}53}{12} = 1{,}62\ T$$

$$B_{1\text{С}} = \frac{12{,}7 \times 1{,}25}{12} = 1{,}32\ T \qquad B_{2\text{С}} = \frac{12{,}7 \times 1{,}35}{12} = 1{,}43\ T$$

Все вычисленные индукции находятся в пределах, указанных в таблице 5 или близки к ним. При a_1 = 2

$$w_{1\text{эп}} = \frac{2{,}5 \times 220 \times 2 \times 2 \times 10^2}{0{,}75 \times 36 \times 14{,}5 \times 23{,}5 \times 0{,}937} = 25{,}4 \approx 26$$

Сравнив варианты обмотки при a_1 = 1 и a_1 = 2 отдаем предпочтение обмотке без параллельных ветвей в фазе (a_1 = 1), при $w_{1\text{эп}}$ = 12 значение коэффициента заполнения паза и использование активных частей электродвигателя здесь более высокие, чем в обмотке с двумя параллельными ветвями в фазе (a_1 = 2) и $w_{1\text{эп}}$ = 14.
Как показывает дальнейший расчет при a_1 = 1 диаметр изолированного элементарного проводника не превышает допустимого значения. Сечение изолированного провода находим по формуле 18 при коэффициенте заполнения паза медью равном 0,4 (табл. 5) рассчитывается при трех вариантах числа элементарных проводников в эффективном проводе: m_1 = 1, 2 и 3.
При m_1 = 1

$$q_{1\text{И}} = \frac{0{,}4 \times 125}{1 \times 12} = 4{,}17\ \text{мм}^2, d_{1\text{И}} = 1{,}13 \times \sqrt{4{,}17} = 2{,}3\ \text{мм}.$$

При m_1 = 2

$$q_{1\text{И}} = \frac{0{,}4 \times 125}{2 \times 12} = 2{,}08\ \text{мм}^2, d_{1\text{И}} = 1{,}13 \times \sqrt{2{,}08} = 1{,}63\ \text{мм}.$$

При m_1 = 3

$$q_{1\text{И}} = \frac{0{,}4 \times 125}{3 \times 12} = 1{,}39\ \text{мм}^2, d_{1\text{И}} = 1{,}13 \times \sqrt{1{,}39} = 1{,}34\ \text{мм}.$$

Предпочтение следует отдать обмотке с тремя элементарными проводниками в эффективном проводе m_1 = 3, при обмотке с m_1 = 1 диаметр изолированного проводника превосходит предельный, а при m_1 = 2 – близок к предельному.
Выбираем обмоточный привод ПЭЛБО, двухсторонняя толщина изоляции которого при указанном диаметре изолированного провода согласно таблице 17 составляет 0,21 *мм*.:

$$1{,}34 - 0{,}21 = 1{,}13 \text{ мм.}$$

По таблице 16 выбираем провод ближайшего стандартного диаметра d_1 = 1,12 *мм*., сечение которого q_1 = 0,985 *мм*. Фазный ток вычисляем по формуле 4 при трех вариантах плотности тока (согласно табл. 5), J_1 = 5,0, 5,5 и 6,0 $A/мм^2$.:

$$\text{при } J_1 = 5\ A/\text{мм}^2, I_{1Ф} = 5 \times 0{,}985 \times 3 \times 1 = 14{,}7\ A$$

$$\text{при } J_1 = 5{,}5\ A/\text{мм}^2, I_{1Ф} = 5{,}5 \times 0{,}985 \times 3 \times 1 = 16{,}3\ A$$

$$\text{при } J_1 = 6{,}0\ A/\text{мм}^2, I_{1Ф} = 6{,}0 \times 0{,}985 \times 3 \times 1 = 17{,}7\ A$$

Линейная нагрузка по формуле 17, при указанных трех значениях:
при $I_{1Ф}$ = 14,7 A

$$A_1 = \frac{14{,}7 \times 36 \times 12}{3{,}14 \times 14{,}5 \times 1} = 140\ A/\text{см.}$$

при $I_{1Ф}$ = 16,3 A

$$A_1 = \frac{16{,}3 \times 36 \times 12}{3{,}14 \times 14{,}5 \times 1} = 155\ A/\text{см.}$$

при $I_{1Ф}$ = 17,7 A

$$A_1 = \frac{17{,}7 \times 36 \times 12}{3{,}14 \times 14{,}5 \times 1} = 168\ A/\text{см.}$$

Все три значения не превышают допустимых значений указанных в таблице 5. Произведение $J_1 \times A_1$ (фактор нагрева) при указанных трех значениях A_1 = 140, 155, 168 $A/см$. и максимальном значении J_1 = 6,0 $A/мм^2$:
при A_1 = 140 $A/см$.

$$J_1 \times A_1 = 6 \times 140 = 840\ A^2/(\text{мм}^2 \times \text{см.})$$

при A_1 = 155 $A/см$.

$$J_1 \times A_1 = 6 \times 155 = 930\ A^2/(\text{мм}^2 \times \text{см.})$$

при A_1 = 168 $A/см$.

$$J_1 \times A_1 = 6 \times 168 = 1008\ A^2/(\text{мм}^2 \times \text{см.})$$

Все три значения $J_1 \times A_1$ не выше допустимых указанных в таблице 5, поэтому принимается максимальное значение – 1008 $A^2/мм^2 \times см$., чему соответствует $I_{1Ф}$ = 17,7 А, при котором использование электродвигателя будет более полным, чем при двух других значениях фазового тока. Номинальная мощность электродвигателя по формуле 15. При значениях η = 87,5% и $cos\varphi$ = 0,88, согласно таблице 7:

$$P = \frac{\sqrt{3} \times 380 \times 17{,}7 \times 0{,}874 \times 0{,}88}{1000} = 9 \text{ квт.}$$

Что практически совпадает с мощностью электродвигателя определенной ранее предварительно.

Расчет средней длины витка катушки и массы обмотки.

Средняя длина витка обмотки, *см.*, с мягкими (всыпными) катушками:

$$l\text{ср} = \frac{K \times (D \pm h_З \times y_П)}{Z} + 2 \times l_С + 6$$

где: D – внутренний диаметр сердечника статора или наружный диаметр сердечника ротора, *см.*, $h_З$ – высота зубца, *см.*, $y_П$ – шаг обмотки по пазам, Z – число пазов, $l_С$ = длина сердечника, *см.*, A – коэффициент, определяемый по таблице 19.
В формуле знак плюс относится к обмотке статора, знак минус к обмотке ротора.

Таблица 19.

при числе полюсов, $2p$	значение коэффициента K	
	двухслойная обмотка	однослойная обмотка
2	8,2	9,2
4	8,5	9,5
6	9,1	10,2
8 и более	9,8	11,0

Масса в *кг.*, изолированного медного провода трех фаз обмотки составляет (с округлением):

$$G = 5 \times l_{СР} \times w_{ЭП} \times m \times Z \times q \times 10^{-5}$$

где: $l_{СР}$ – средняя длина витка катушки, *см.*, $w_{ЭП}$ – число эффективных проводов в пазу, m – число элементарных проводников в эффективном проводе, q – сечение не изолированного элементарного проводника, $мм^2$., Z – число пазов. Для определения веса обмотки из алюминиевого провода следует в приведенной формуле цифру 5 заменить на 1,5.

При ремонте электродвигателей следует обращаться к современным сведениям по изоляционным материалам, данным обмоточных проводов, к другим стандартам и справочным материалам. Так как часть информации по этим данным приведенная в этой публикации устарела.

1. Альбом технологических карт на ремонт трехфазных электродвигателей.
БТИ ГОСНИТИ, М., 1957.
2. Бабенко Д. А., Тепленко С. И., Чибишев Л. Д.
В помощь электрику обмотчику асинхронных электродвигателей, М., "Энергия", 1965.
3. Девятков Л. Ф. и др. Ремонт электросилового оборудования. М, "Колос", 1971.
4. Жерве Г. К. Расчет асинхронного двигателя при ремонте. М. "Энергия", 1967.
5. Зимин В. И. и др. Обмотки электрических машин. М., Госэнергоиздат, 1970.
6. Кокорев А. С. Справочник молодого обмотчика электрических машин. М. "Высшая школа", 1969.
7. Кравчик Э. Д. Расчет обмоток низковольтных асинхронных двигателей при ремонте ЦБТИ МЭП, М., 1963.
8. Маршак Е. Л., Уманцев Р. В. Схемы обмоток статоров, М., "Энергия", 1967.
9. Маршак Е. Л. Ремонт и модернизация асинхронных двигателей, М., "Энергия", 1970.
10. Никулин И. В. Справочник молодого электрика по электротехническим материалам и изделиям. М. "Высшая школа", 1967.
11. Организация и технология ремонта электрических машин, Московский дом научно технический пропаганды". М., 1959.
12. П. И. Цибулевский, под ред., М, "Энергия", 1971. Обмоточные данные асинхронных двигателей. Конструкторско–технологическое бюро по ремонту электрооборудования,
13. Пястолов А. А., Шац Е. Л., Блюмберг В. А.
Эксплуатация и ремонт электрооборудования, М. "Колос", 1966.
14. Слоним Н. М. Алюминиевые провода при ремонте асинхронных электродвигателей М., "Энергия", 1973.
15. Уманцев Р. Б., Конструкция и ремонт короткозамкнутых обмоток роторов крупных двигателей. М. "Энергия", 1967.

Содержание